

N O T I C E

THIS DOCUMENT HAS BEEN REPRODUCED FROM
MICROFICHE. ALTHOUGH IT IS RECOGNIZED THAT
CERTAIN PORTIONS ARE ILLEGIBLE, IT IS BEING RELEASED
IN THE INTEREST OF MAKING AVAILABLE AS MUCH
INFORMATION AS POSSIBLE

Forschungsinstitut für Anthropotechnik

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE NATURWISSENSCHAFTEN E. V.

**Überwachungs- und Entscheidungsverhalten
des Menschen
in Mensch-Maschine-Systemen**

G. Johannsen

RECEIVED BY **D**
ESA - SDS
DATE: - 6 MAR 1980
DCAF NO. **002631**
PROCESSED BY
☐ NASA STI FACILITY
☒ ESA - SDS ☐ AIAA

Bericht Nr. 44

Bericht Nr. 44

Überwachungs- und Entscheidungsverhalten
des Menschen in Mensch-Maschine-Systemen

Institutsdirektor :
Prof. Dr.-Ing. R. Bernotat

Autor :
Dr.-Ing. G. Johannsen

Mai 1979

Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e.V.
Forschungsinstitut für Anthropotechnik
Königstraße 2, D-5307 Wachtberg-Werthhoven, Tel. (02221) 852-1

—— Schutzgebühr DM 10,-- ——

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	1
Vorwort	2
1. Einleitung	3
2. Überwachung und Aufmerksamkeitsverteilung	6
2.1 "Klassische" Überwacher-Modelle	6
2.2 Optimaltheoretische Überwacher-Modelle	10
2.3 Bemerkungen über Aufmerksamkeitsverteilung und Blickbewegungen	16
2.4 Ein Beispiel : Bewertung von Voranzeigen mit Hilfe des optimaltheoretischen Modells	18
3. Fehlerentdeckung, -diagnose und -korrektur	25
3.1 Fehlerentdeckung bei kontinuierlichen Signalen	26
3.2 Entscheidungsverhalten bei der Fehlerdiagnose	34
4. Rechnergestützte Entscheidung und Managementinformations- systeme	40
4.1 Rechnergestützte Entscheidung als Warteschlangenproblem	41
4.2 Rechnerunterstützung in Abhängigkeit vom Aktivitätszu- stand des Menschen	48
4.3 Kombination mehrerer Tätigkeiten in Mensch-Maschine- Managementaufgaben	49
4.4 Managementinformationssysteme und Gruppenentscheidungs- verhalten	51
5. Schlußbemerkungen und Ausblick	53
6. Literaturverzeichnis	55
Anhang : Mathematical Concepts for Modeling Human Behavior in Complex Man-Machine Systems (von G. Johannsen und W.B. Rouse)	62

Zusammenfassung

Überwachung und Entscheidung charakterisieren zusammen recht gut die Rolle des Menschen in hochautomatisierten Systemen. Neben der Analyse des menschlichen Überwachungs- und Entscheidungsverhaltens wird in diesem Bericht besonders dessen Modellierung beschrieben. Die Zielsetzung dabei ist es, eine Übersicht zu vermitteln.

Es werden "klassische" und optimaltheoretische Überwacher-Modelle behandelt sowie der Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeitsverteilung und Blickbewegungen diskutiert. Als Anwendungsbeispiel wird die Bewertung von Voranzeigen mit Hilfe des optimaltheoretischen Modells erläutert. Die Fehlerentdeckung bei kontinuierlichen Signalen und das Entscheidungsverhalten des Menschen bei der Fehlerdiagnose in verschiedenen Betriebs- und Wartungssituationen werden veranschaulicht. Die rechnergestützte Entscheidung wird als Warteschlangenproblem behandelt. Es wird aufgezeigt, inwieweit bei der Rechnerunterstützung vom Aktivitätszustand des Menschen aufgrund psychophysiologischer Meßgrößen ausgegangen werden kann. Abschließend werden Managementinformationssysteme für verschiedene Anwendungsbereiche angesprochen.

Als Anhang enthält der Bericht einen englischsprachigen Aufsatz, in dem die Möglichkeiten der mathematischen Modellbildung des menschlichen Verhaltens in komplexen Mensch-Maschine-Systemen kritisch bewertet werden.

Abstract

Monitoring and decision-making together are very well characterizing the role of the human operator in highly automated systems. In this report, the analysis of human monitoring and decision-making behavior as well as its modeling are described. The goal is to present a survey.

"Classic" and optimal control theoretic monitoring models are dealt with. The relationship between attention allocation and eye movements is discussed. As an example for applications, the evaluation of predictor displays by means of the optimal control model is explained. Fault detection in continuous signals and decision-making behavior of the human operator in fault diagnosis during different operation and maintenance situations are illustrated. The computer-aided decision-making is considered as a queueing problem. It is shown to what extent computer-aiding may be based on the state of human activity as measured by psychophysiological quantities. Finally, management information systems for different application areas are mentioned.

As an appendix, the report includes an English-written paper in which the possibilities of mathematical modeling of human behavior in complex man-machine systems are critically assessed.

Vorwort

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse zusammen, die bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens des BMVg über das Thema "Überwachungs- und Entscheidungsverhalten des Menschen in Mensch-Maschine-Systemen" (Auftrag Nr. T/RF36/71507/71323) gewonnen wurden. Der Autor hielt sich zur Bearbeitung dieses Vorhabens in der Zeit von September 1977 bis Mai 1978 an der University of Illinois, Coordinated Science Laboratory und Department of Mechanical and Industrial Engineering, Urbana-Champaign, Illinois, auf. Dabei bestand u.a. Gelegenheit zur Mitarbeit am Forschungsprojekt "Pilot Interaction with Automated Airborne Decision Making Systems".

Der USA-Aufenthalt führte zu einem guten Überblick und detaillierten Kenntnissen über die Forschungsmethoden zur Analyse und Modellierung des menschlichen Überwachungs- und Entscheidungsverhaltens. Es wurden sowohl ingenieurwissenschaftlich-mathematische als auch psychologische Arbeitsansätze verfolgt. Gute Einblicke ergaben sich auch in die Anwendung dieser Methoden beim Entwurf von z.T. rechnergestützten Überwachungs-, Fehlerdiagnose-, Managementinformations- und Entscheidungssystemen.

Für zahlreiche wertvolle Anregungen, Diskussionen und Literaturhinweise habe ich vielen amerikanischen Kollegen herzlich zu danken. Stellvertretend für alle sei Prof. William B. Rouse genannt, dessen Aufgeschlossenheit und Hilfsbereitschaft wesentlich zum Erfolg des Vorhabens beitrugen.

Das Ziel des Berichtes ist es, eine Übersicht zu vermitteln. Gelegentlich führte das zu einer sehr straffen Darstellung. Die eigenen Forschungsergebnisse, die während und unmittelbar nach dem USA-Aufenthalt erarbeitet wurden, sind dagegen etwas ausführlicher erläutert worden. Hierbei handelt es sich um den Aufsatz [7], der diesem Bericht als Anhang angefügt ist und um die Arbeiten [19], [33], die im Abschnitt 2.4 beschrieben werden.

Bei meinen Kollegen, den Herren Dipl.-Ing. G. Dörfel, Dipl.-Psych. C. Pfendler und Dipl.-Ing. W. Stein, bedanke ich mich für kritisches Gegenlesen und Anregungen zur Verbesserung des Manuskripts. Frau C. Lengen danke ich für das Schreiben des Manuskripts sowie den Herren D. Schmitt und St. Woizik für das Anfertigen der Zeichnungen.

1. Einleitung

Die zunehmende Automatisierung verändert die Rolle des Menschen in Mensch-Maschine-Systemen [1]. Dies gilt z.B. für die Fahrzeugführung, für Lenk- und Leitsysteme und für die industrielle Prozeßführung. Die wesentliche Triebkraft für die Automatisierung ist die Forderung nach Leistungssteigerung und erhöhter Wirtschaftlichkeit der vom Menschen geführten technischen Systeme. Daneben treten seit einigen Jahren weitere Kriterien deutlicher in den Vordergrund - humane Arbeitsplatzgestaltung und Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit der komplexer werdenden Mensch-Maschine-Systeme. Zwischen allen genannten Kriterien bestehen Wechselwirkungen, die in der Praxis zu Zielkonflikten führen können.

Um zu einer allseits befriedigenden Lösung zu gelangen, muß eine qualitativ veränderte Automatisierung angestrebt werden. Rechenanlagen werden dabei nicht nur eingesetzt, um Aufgaben auszuführen, sondern auch, um Aufgaben zu planen und zu bewerten und um damit als Partner des Menschen diesen zu unterstützen (siehe auch [2]). Die Maßnahmen der Rechnerunterstützung und solche der Arbeitsorganisation müssen sich gegenseitig ergänzen. Sie setzen Kenntnisse über das Arbeitsverhalten des Menschen voraus.

Der vorliegende Bericht soll hierzu beitragen. Es erfolgt eine Beschränkung auf Tätigkeiten in Mensch-Maschine-Systemen. Die manuellen Steuerungs- und Regelungstätigkeiten werden dabei nur gelegentlich angesprochen, da ausführliche Darstellungen bereits vorliegen (siehe z.B. [3], [4]). Dagegen werden vor allem Überwachungstätigkeiten sowie diagnostizierende und kommunikative Tätigkeiten behandelt, die durch die Automatisierung zunehmende Bedeutung erlangt haben. Einige Beispiele für eine Rechnerunterstützung des Menschen werden ebenfalls dargestellt. Der Bericht will eine Übersicht vermitteln. Für ein vertieftes Verständnis sei auf die jeweiligen Originalarbeiten verwiesen.

In der Literatur werden die informationsverarbeitenden Prozesse im Menschen gelegentlich in Wahrnehmungsprozesse, sensomotorische Prozesse, Entscheidungsprozesse und Problemlösungsprozesse untergliedert (siehe z.B. [5]). An den in diesem Bericht behandelten Tätigkeiten des Menschen sind vorwiegend Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse beteiligt. Damit wird deutlich, daß die bei-

den Verhaltensaspekte, die im Titel dieses Berichtes nebeneinander erscheinen, Überwachung und Entscheidung, streng genommen in zwei verschiedenen Ordnungsschemata zu sehen sind. Überwachung ist eine Tätigkeit des Menschen, Entscheidung dagegen ein informationsverarbeitender Prozeß.

Überwachung und Entscheidung charakterisieren zusammen recht gut die Rolle des Menschen in hochautomatisierten Systemen.

Die Überwachung dient der Gewinnung von Information über den Systemzustand von Maschine und Umwelt sowie der Entdeckung von Fehlern und anderen Ereignissen. Ein Entscheidungsvorgang wird dadurch gekennzeichnet, daß eine Auswahl zwischen mehreren Handlungsalternativen zu treffen ist (siehe z.B. [3], [6]). Durch die Beobachtung der Konsequenzen einer gewählten Handlung kann gleichzeitig eine etwa bestehende Ungewißheit über den Systemzustand von Maschine und Umwelt verringert werden.

Bei der Behandlung des Themas werden in diesem Bericht vor allem ingenieurwissenschaftlich-mathematische, daneben aber auch psychologische Arbeitsansätze betrachtet. Neben der Analyse des menschlichen Überwachungs- und Entscheidungsverhaltens wird besonders dessen Modellierung untersucht.

Eine Studie hierzu ist während des USA-Aufenthaltes des Autors erarbeitet worden [7]. Sie ist als Anhang Teil dieses Berichtes und stellt in Ergänzung zum Hauptteil eine kritische Bewertung der mathematischen Modellierungsmöglichkeiten dar. Ausgehend vom Beispiel des Autofahrens wird eine Hierarchie menschlicher Aktivitäten in komplexen Mensch-Maschine-Systemen aufgestellt. Die Aktivitäten werden zu drei Verhaltensaspekten zusammengefaßt: (1) Aufnahme und Interpretation von Eingangsinformation, (2) Planung und (3) Ausführung von Plänen. Getrennt nach diesen drei Aspekten werden mathematische Modelle und mögliche Ansätze betrachtet. Dabei werden z.B. Nutzen-, Schätz-, Regelungs- und Warteschlangentheorie sowie die Theorie unscharfer Mengen und die Methoden der künstlichen Intelligenz berücksichtigt. Viele Probleme und davon abgeleitete Hinweise für weitere Forschungsarbeiten werden aufgezeigt.

Sowohl im Anhang dieses Berichtes als auch in einem anderen neueren Bericht [8] zur Bewertung von Modellen für Mensch-Maschine-Systeme wird eine kritische Bilanz des Erreichten gezogen und die Notwendigkeit betont, zukünftig verschiedenartige Modelle zu integrieren. Damit ließe sich der Nutzen der Modellierung weiter erhöhen, der vor allem in der Vorhersage der Leistung und Zuverlässigkeit eines Mensch-Maschine-Systems und damit in der Einsparung von zeit- und kostenaufwendigen Experimenten im Simulator oder Echtssystem liegt.

In [8] wird zwischen synthetischen und analytischen Modellansätzen zur Beschreibung von Mensch-Maschine-Systemen unterschieden. Da hierdurch eine Einordnung der in diesem Bericht behandelten Modelle in einen übergeordneten Rahmen sichtbar wird, sei dieser Unterschied kurz angesprochen.

Die synthetischen Modellansätze sind Netzwerkverfahren. Die Elementarkomponenten der menschlichen Tätigkeit müssen hierbei definiert und mit Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ihrer Ausführungszeiten vorgegeben werden. Durch Verknüpfungen der Elementarkomponenten wird dann das Netzwerk zur Beschreibung einer komplexen Aufgabensituation synthetisiert ("bottom-up approach"). Als wesentliche Ergebnisse werden Ausführungszeiten und Zuverlässigkeiten für das Gesamtsystem mittels Rechnersimulation ermittelt. Die Hauptprobleme der Verfahren bestehen darin, die erforderlichen Daten bereitzustellen und eine angemessene Netzwerkstruktur zu finden. Die Daten können z.B. aus Mensch-Maschine-Experimenten, aus Expertenurteilen und aus analytischen Modellen gewonnen werden. Einige bekannte Beispiele derartiger Verfahren sind das Siegel-Wolf-Modell [9] und die Simulationssprache SAINT [10].

Unter den analytischen Modellansätzen werden in [8] die Modelle der menschlichen Tätigkeit im engeren Sinne verstanden. Hierbei wird von dem jeweiligen Ziel der Leistungsvorhersage ausgegangen und die Tätigkeit nur so weit aufgliedert, wie es für die Untersuchung erforderlich ist ("top-down approach"). Das Problem besteht bei diesen Modellen darin, für die interessierende Aufgabe geeignete analytische Beschreibungen zu finden. Beispiele sind die Regler-Mensch-Modelle sowie die meisten in diesem Bericht behandelten Modelle für den Menschen als Überwacher und Entscheider (siehe z.B. auch [3], [4]).

2. Überwachung und Aufmerksamkeitsverteilung

Überwachungstätigkeiten des Menschen dienen der Gewinnung von Information über den Systemzustand von Maschine und Umwelt sowie der Entdeckung von Fehlern und anderen Ereignissen. In diesem Kapitel wird vor allem der erste Aspekt betrachtet. Dabei werden ausschließlich kontinuierliche Signalverläufe angenommen.

In komplexen Mensch-Maschine-Systemen muß der Mensch eine Vielzahl von Informationsquellen überwachen, wie z.B. die Anzeigefelder in Prozeßwarten oder im Flugzeugcockpit. Aufgrund seiner Informationsverarbeitungseigenschaften kann der Mensch nur begrenzt parallele Information gleichzeitig aufnehmen (siehe z.B. [11]). Das zwingt zu einem Abtastverhalten, bei dem durch Blickbewegungen verschiedene Anzeigen nacheinander fixiert werden. Diese serielle Informationsaufnahme wird im ausgelerten Zustand entsprechend der gestellten Aufgabe prioritätsgesteuert ausgeführt, um eine angemessene Aufmerksamkeitsverteilung zu erreichen. Somit ergeben sich aufgabenabhängige Abtaststrategien.

Im folgenden werden verschiedene Modelle zur Beschreibung menschlicher Überwachungstätigkeiten betrachtet und der Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeitsverteilung und Blickbewegungen erläutert. Ein Beispiel mit eigenen Ergebnissen wird abschließend behandelt.

2.1 "Klassische" Überwacher-Modelle

Das erste quantitative Modell zur Beschreibung des menschlichen Abtastverhaltens ist von Senders entwickelt worden [12]. Es baut auf Ideen aus der Informationstheorie auf, insbesondere dem Shannonschen Abtasttheorem. Der Mensch wird durch ein Ein-Kanal-Abtastmodell beschrieben. Dadurch wird berücksichtigt, daß das menschliche Auge in jedem Augenblick nur einen Bildpunkt fixieren kann. Ferner wird angenommen, daß eine Vielzahl von Anzeigen abgetastet wird und aus den Abtastwerten die beobachteten kontinuierlichen Zeitfunktionen wieder rekonstruiert werden können.

Die einzelnen angezeigten Größen seien nicht miteinander korrelierte stochastische Signale $y_i(t)$. Die Fixationsfrequenz für das i -te Signal ergibt sich aus

dessen Grenzfrequenz ω_i und muß nach dem Abtasttheorem wenigstens

$$\omega_{F,i} = 2 \omega_i \quad (1)$$

betragen.

Nimmt man an, daß der Mensch als Beobachter eine begrenzte Eingangskanalkapazität besitzt, dann hängt die Dauer jeder einzelnen Fixation linear von der aufzunehmenden Information ab. Im Mittel ergibt sich für die Fixationsdauer :

$$D_i = c_1 \log_2 \frac{\sigma_{y_i}}{E_i} + c_2 \quad (2)$$

wobei σ_{y_i} der Effektivwert des i-ten Signals, E_i der zulässige Effektivwert und c_1 , c_2 Konstanten sind. Durch c_2 wird die Übergangszeit zwischen verschiedenen Anzeigen und die minimale Fixationszeit festgelegt.

Aus Gln. (1), (2) ergibt sich der bezogene Anteil f_i der Verweilzeit für die Beobachtung der i-ten Anzeige :

$$f_i = \omega_{F,i} D_i = 2 c_1 \omega_i \log_2 \frac{\sigma_{y_i}}{E_i} + 2 c_2 \omega_i \quad (3)$$

Die minimale Zeit zur Beobachtung von m Anzeigen bezogen auf die Gesamtzeit wird dann wie folgt berechnet :

$$T_m = \sum_{i=1}^m f_i = 2 \sum_{i=1}^m \omega_i (c_1 \log_2 \frac{\sigma_{y_i}}{E_i} + c_2) \quad (4)$$

Wenn $T_m < 1$ ist, dann besteht noch eine verfügbare Kapazität, z.B. für die Beobachtung zusätzlicher Anzeigen. Weiterhin werden in [12] die Wahrscheinlichkeiten für die Fixation der einzelnen Anzeigen und für die Übergänge zwischen verschiedenen Anzeigen angegeben.

Das Modell beschreibt das menschliche Abtastverhalten unter den gegebenen idealisierten Randbedingungen recht genau. Es hat den Ausgangspunkt für viele nachfolgende Arbeiten gebildet. Darin liegt dessen große Bedeutung. Einige wesentliche Nachteile seien jedoch ebenfalls kurz erwähnt. Für das Modell

letzten Ablesung anwächst. Dies wird im Bild 1 für eine der vorhandenen Anzeigen veranschaulicht. Im letzten Abtastzeitpunkt ($t = 0$) ist der abgelesene Wert exakt bekannt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, die allgemein eine gewisse Unsicherheit bezüglich dieses Wertes beschreiben soll, wird hier entsprechend zu einem unendlich schmalen Impuls. Mit zunehmendem zeitlichen Abstand von der letzten Ablesung werden zwei Einflüsse sichtbar, die sich bei der Schätzung des weiteren Signalverlaufs auswirken. Erstens muß eine determinierte Veränderung der Amplitude des beobachteten Signals durch Stellgrößen (control action) erwartet werden, falls solche auftreten können. Hierfür wird im Modell ein exponentieller Verlauf angenommen. Zweitens wächst die Unsicherheit über den tatsächlichen Signalverlauf mit wachsendem Abstand seit der letzten Ablesung. Dies prägt sich in einer zunehmenden Verbreiterung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion aus. Wie Bild 1 zeigt, vergrößert sich dadurch die Wahrscheinlichkeit einer Schwellenüberschreitung (schraffierte Bereiche). Die subjektive Varianz des Signalverlaufs wird beschrieben durch :

$$\sigma^2(t) = \sigma_0^2 [1 - \rho^2(t) + H t] , \quad (5)$$

wobei σ_0^2 die Varianz der Abtastwerte des beobachteten Signals, $\rho(t)$ dessen normierte Autokorrelationsfunktion und H ein Divergenzfaktor ist, der Drifteffekte und das Vergessen des Menschen berücksichtigt.

Für die Überwachung mehrerer Anzeigen wird der beschriebene Beobachtungs- und Schätzprozeß in das erwähnte Warteschlangenmodell integriert. Offensichtlich ist für die Entscheidung, welche Anzeige als nächste abgelesen werden soll, das zu erwartende Risiko einer Schwellenüberschreitung bedeutsam. Dementsprechend müssen Prioritäten für eine Wartedisziplin der Schlange aller zu beobachtenden Anzeigen festgelegt werden. Damit ergibt sich zwangsläufig, daß die einzelnen Signale aperiodisch abgetastet werden. Das Prioritätssystem für die Wartedisziplin ist im vorliegenden Fall relativ kompliziert. Es besteht eine Abhängigkeit von den Werten der letzten Ablesungen, von den verstrichenen Zeitabständen seit den letzten Ablesungen und von der aufgabenbedingten Risiko-Kosten-Hierarchie bezüglich der Schwellenüberschreitungen der einzelnen Anzeigen.

Das beschriebene Modell erlaubt keine analytisch geschlossene Lösung. Es ist daher mittels Digitalrechnersimulation erprobt worden. Eine Validierung erfolgte durch Blickbewegungsmessungen beim Anflug und der Landung in einem Flugsimulator [14]. Dabei ist eine recht gute Übereinstimmung zwischen experimentell und theoretisch ermittelten mittleren Fixationszeiten für die einzelnen Anzeigen erzielt worden.

2.2 Optimaltheoretische Überwacher-Modelle

Das optimaltheoretische Modell ist von Baron, Kleinman und Levison zunächst zur Beschreibung des Menschen als Regler entwickelt worden [15]. Es ist für mehrdimensionale Aufgaben sehr gut geeignet. Eine Aufmerksamkeitsverteilung bei mehreren Anzeigen wird im Wahrnehmungsteil des Modells berücksichtigt. In jüngerer Zeit sind hierauf aufbauend sowohl Verfahren für Anzeigenbewertung und -entwurf (siehe z.B. [16], [17]) als auch Modelle für den Menschen als Überwacher [18] erarbeitet worden.

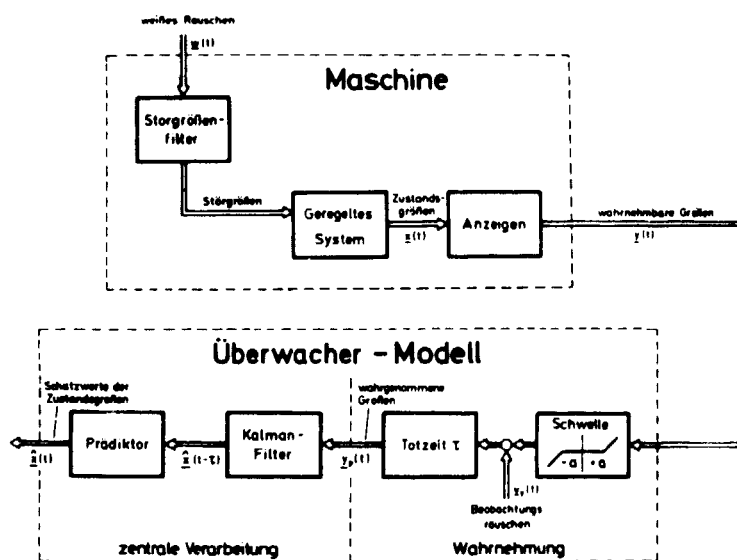


Bild 2 : Blockschaltbild des Mensch-Maschine-Systems mit dem optimaltheoretischen Modell für den Menschen als Überwacher

Im Bild 2 sind das optimaltheoretische Modell für den Menschen als Überwacher und das automatisch geregelte technische System als Mensch-Maschine-System dargestellt. Es wird vorausgesetzt, daß das zu überwachende technische System

linear oder aber genügend gut linearisierbar ist. Die Dynamik des Systems wird in der Zustandsraumdarstellung angegeben :

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) + \underline{E} \underline{w}(t) \quad . \quad (6)$$

Dabei sind $\underline{x}(t)$ die Zustandsgrößen und $\underline{w}(t)$ weißes Rauschen. Die Störgrößenfilter, die aus dem weißen Rauschen die tatsächlichen Störgrößen erzeugen, können durch eine Erweiterung des Zustandsvektors mit der Systemdynamik zusammengefaßt werden. Außerdem umfaßt diese auch Untersysteme wie z.B. Meßgeber, Stellglieder und automatische Regler.

In der Regel werden nur einige Zustandsgrößen bzw. ihre Linearkombinationen angezeigt. Dies führt mit der Beobachtungsmatrix \underline{C} zu der Ausgangs- oder Beobachtungsgleichung

$$\underline{y}(t) = \underline{C} \underline{x}(t) \quad , \quad (7)$$

wobei auch die ersten Ableitungen angezeigter Größen als wahrnehmbare Größen in $\underline{y}(t)$ eingeschlossen sein können. Die Matrizen \underline{A} , \underline{C} und \underline{E} sind bei zeitunveränderlichen Systemen konstant.

Die Beobachtungsmatrix \underline{C} wird dazu verwendet, zwei verschiedene Einflußfaktoren zu erfassen, und zwar den Einfluß physikalisch angezeigter Größen und den der menschlichen Wahrnehmung der Änderungsgeschwindigkeit einer Größe.

Die physikalisch angezeigten Größen sind entweder Zeigerstellungen u.ä. oder die Elemente graphischer Darstellungen, z.B. eine Punktfolge als Approximation einer gekrümmten Linie. Einzelne wahrnehmbare Größen als Komponenten des Vektors $\underline{y}(t)$ lassen sich somit unmittelbar ablesen, während andere aus graphischen Darstellungen abgeleitet werden müssen. Beispiele aus der Fliegführung für die erste Kategorie sind Fahrt- und Höhenanzeige, die Anzeigen von Nick- und Rollwinkel im künstlichen Horizont sowie die Flugkommandoanzeigen. Die letzteren werden im Flugkommandorechner aus einer gewichteten Summe mehrerer Zustandsgrößen errechnet. Die entsprechenden Gewichtungsfaktoren werden in die Beobachtungsmatrix aufgenommen.

Aus graphischen Darstellungen abgeleitete Größen ergeben sich z.B. bei einigen Voranzeigen und bei der Außensichtdarstellung einer Landebahn. Wird eine extrapolierte Bahn als Voranzeige berechnet, so kann das angezeigte Bahnelement durch einige äquidistante Punkte ausreichend genau angenähert werden. Die Bahnabweichungen dieser Punkte werden einzeln als wahrnehmbare Größen in der Beobachtungsmatrix berücksichtigt [19]. Im Falle von Landebahn- oder anderen Außensichtdarstellungen müssen die für den menschlichen Wahrnehmungsvorgang charakteristischen Elemente aus der Anzeigengeometrie ermittelt und als Komponenten der Beobachtungsmatrix beschrieben werden [20], [21].

Der zweite Einflußfaktor, der in der Beobachtungsmatrix erfaßt wird, ist die menschliche Wahrnehmung der Änderungsgeschwindigkeit einer Größe. Es wird angenommen, daß der Mensch im Falle von Analoganzeigen aus der Änderung einer angezeigten Größe deren erste Ableitung ableiten kann, nicht mehr jedoch höhere Ableitungen. Die erste Ableitung einer angezeigten Größe wird dann als zusätzliche wahrnehmbare Größe in den Vektor $\underline{\chi}(t)$ aufgenommen.

Das Modell des Menschen als Überwacher kann in zwei Verarbeitungsstufen untergliedert werden, und zwar in Wahrnehmung und zentrale Verarbeitung (siehe Bild 2). Hieran kann gegebenenfalls eine Handlungsstufe angeschlossen sein, falls Entscheidungen aufgrund der Zustandsschätzung getroffen oder Eingriffe in das geregelte System vorgenommen werden (siehe z.B. [22]).

Das Modell geht von der Annahme aus, daß der Wahrnehmungsvorgang des Menschen fehlerbehaftet ist und Verarbeitungszeit benötigt. Dies wird dadurch repräsentiert, daß die wahrnehmbaren Größen $\underline{\chi}(t)$ von Beobachtungsrauschen $\underline{v}_y(t)$ überlagert und um die Totzeit τ verzögert werden, so daß die wahrgenommenen Größen $\underline{\chi}_p(t)$ lauten:

$$\underline{\chi}_p(t) = \underline{\chi}(t-\tau) + \underline{v}_y(t-\tau) \quad . \quad (8)$$

Die Totzeit τ liegt bei etwa 0,1 - 0,2 s und hat einen relativ kleinen Schwankungsbereich. Das Beobachtungsrauschen $\underline{v}_y(t)$ besitzt unabhängige, normalverteilte, weiße Rauschkomponenten. Die im Bild 2 angegebenen Wahrnehmungsschwellen werden in der Kovarianzmatrix \underline{V}_y des Beobachtungsrauschens

berücksichtigt, worauf weiter unten ausführlicher eingegangen wird.

Der zentralen Verarbeitung liegt die Absicht zugrunde, Schätzwerte für den vollständigen Zustandsvektor zu gewinnen und leistungsmindernde Effekte des Wahrnehmungsvorgangs zu reduzieren, nämlich die Effekte des Beobachtungsrauschens und der Verarbeitungs- bzw. Totzeit. Wie Bild 2 zeigt, werden dazu im Modell die wahrgenommenen Größen $y_p(t)$ einem Kalman-Filter und einem anschließenden Prädiktor zugeführt (siehe z.B. auch [4] , [15]). Filter und Prädiktor benutzen ein lineares Modell der vorgegebenen Systemdynamik und bilden Schätzwerte $\hat{x}(t)$ der Zustandsgrößen. In dieser Funktion des Modells der vorgegebenen Systemdynamik kann eine Analogie zum sogenannten internen Modell des Menschen gesehen werden (siehe z.B. [1]). Für den Schätzfehler $\underline{x}(t) - \hat{\underline{x}}(t)$, d.h. die Differenz der Zustandsgrößen gegenüber den zugehörigen Schätzgrößen, wird durch Filterung und Prädiktion erreicht, daß seine Kovarianzmatrix

$$\underline{\Sigma} = E \{ (\underline{x}(t) - \hat{\underline{x}}(t)) (\underline{x}(t) - \hat{\underline{x}}(t))^T \} \quad (9)$$

im zeitlichen Mittel minimal wird.

Entsprechend Gl. (8) überlagert sich jeder wahrnehmbaren Größe $y_i(t)$ eine Komponente $v_{y_i}(t)$ des Beobachtungsrauschens. Dieses wird durch die Kovarianzmatrix \underline{V}_y gekennzeichnet, deren Elemente wie folgt beschrieben werden (\underline{V}_y ist eine Diagonalmatrix) :

$$V_{y_i} = \pi \frac{P_o}{f_i} \frac{\sigma_{y_i}^2}{N^2 (\sigma_{y_i}, a_i)} \quad , \quad (10)$$

wobei $\sigma_{y_i}^2$ die Varianz der wahrnehmbaren Größe, f_i der zugeordnete Aufmerksamkeitsanteil, P_o das Rausch-Signal-Verhältnis für Eingrößenaufgaben und $N (\sigma_{y_i}, a_i)$ der Verstärkungsfaktor der Beschreibungsfunktion einer toten Zone ist. Die Varianzen $\sigma_{y_i}^2$ und V_{y_i} sind einander proportional, korrespondierend mit dem Gesetz von Weber-Fechner.

$N(\sigma_{y_i}, a_i)$ ist der Verstärkungsfaktor der Beschreibungsfunktion einer toten Zone mit dem Schwellwert a_i . Damit sind die im Bild 2 eingezeichneten Wahrnehmungsschwellen in die mathematische Formulierung der Kovarianzmatrix des Beobachtungsrauschens nach Gl. (10) einbezogen. Dem liegt der Gedanke zugrunde, daß durch einen etwa vorhandenen Schwellwert die entsprechende wahrnehmbare Größe ungenauer wahrgenommen wird und sich dies in einer Erhöhung des Beobachtungsrauschens auswirkt [23].

Es ist ermittelt worden, daß das Rausch-Signal-Verhältnis P_o für Eingrößenregelungsaufgaben bei hochauflösenden Anzeigen 0,01 als typischen Zahlenwert besitzt (entsprechend einem normierten Leistungsdichtepegel von - 20 dB). Dieser Wert kann als Bezugsgröße für andere Aufgaben zur Kennzeichnung einer hohen Auslastung des Menschen und damit auch als Bezugsgröße für einen Beanspruchungsindex übernommen werden [24], [25]. Ein solcher Index beschreibt vor allem die von der Aufmerksamkeit abhängige mentale Beanspruchung des Menschen.

Bei Mehrgrößenaufgaben verteilt sich die gesamte Aufmerksamkeit des Menschen auf die wahrnehmbaren Größen y_i . Diesen sind Aufmerksamkeitsanteile f_i zugeordnet. Für sie gilt:

$$f_i > 0, \quad \sum f_i = f_{\text{ges}}, \quad f_{\text{ges}} \leq 1, \quad (11)$$

wobei f_{ges} die gesamte der Aufgabe zugewendete Aufmerksamkeit darstellt. Das Rausch-Signal-Verhältnis für die i -te wahrnehmbare Größe lautet dann:

$$P_i = \frac{P_o}{f_i}. \quad (12)$$

In [18] werden von Kleinman und Curry verschiedene hypothetische Aufmerksamkeitsverteilungen für Überwachungsaufgaben behandelt. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, eine Gleichverteilung der Aufmerksamkeit auf alle m wahrnehmbaren Größen y_i anzunehmen. Die Aufmerksamkeitsanteile lauten dann:

$$f_i = \frac{f_{\text{ges}}}{m}. \quad (13)$$

Dieser Ansatz ist gelegentlich ausreichend, berücksichtigt jedoch nicht die relative Bedeutung der verschiedenen Anzeigen für die Erfüllung der Überwachungsaufgabe.

Eine andere Aufmerksamkeitsverteilung ergibt sich, wenn extreme Abweichungen der einzelnen Signale überwacht werden sollen. Es wird eine erhöhte Aufmerksamkeit gefordert, wenn das Signal y_i z.B. ein Vielfaches β der Standardabweichung σ_{y_i} überschreitet. Die Aufmerksamkeitsanteile nehmen dann die folgende Form an :

$$f_i \geq f_i^0 \cdot P \{ |y_i| > \beta \sigma_{y_i} \} \quad (14)$$

Dabei wird angenommen, daß der Mensch das Signal y_i mit der Wahrscheinlichkeit f_i^0 beobachtet, wenn $|y_i|$ größer als $\beta \sigma_{y_i}$ wird. Die Werte f_i^0 und β müssen in sinnvoller Weise und unter Berücksichtigung von Gl. (11) gewählt werden. Die f_i^0 sollten die Wichtigkeit der einzelnen Anzeigen berücksichtigen.

Weitere Aufmerksamkeitsverteilungen ergeben sich nach [18], wenn man die Aufmerksamkeitsanteile f_i so festlegt, daß ein geeignetes Gütekriterium minimiert wird. Eine entsprechende Version des optimaltheoretischen Modells gestattet die Optimierung der f_i mit Hilfe eines Gradientenverfahrens [26], [27], [28]. Bisher liegen praktische Erfahrungen vor allem für die Aufmerksamkeitsverteilung in Regelungsaufgaben vor, bei denen das Gütekriterium

$$J(\underline{f}, \underline{u}) = \sum_{i=1}^m q_i \sigma_{y_i}^2 + \sum_{i=1}^m g_i \sigma_{\dot{u}_i}^2 \quad (15)$$

zu minimieren ist (siehe auch Abschnitt 2.4). Die Gewichtungsfaktoren q_i sind vorgebar und berücksichtigen u.a. Aufgabenanforderungen und Anzeigenskalierungen. Mit den Gewichtungsfaktoren g_i werden die neuromuskulären Verzögerungskonstanten eingestellt, d.h. entsprechende Beschränkungen der Stellgeschwindigkeiten \dot{u}_i vorgenommen.

Für Überwachungsaufgaben muß bei der Optimierung der Aufmerksamkeitsanteile f_i von anderen Gütekriterien ausgegangen werden. Nach [18] ergibt sich

folgendes Gütekriterium als verallgemeinerte Grundform sowohl für die Zustandsüberwachung als auch für die Fehlerentdeckung :

$$J(f) = \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_{e_i}^2}{\sigma_{y_i}^2} \quad , \quad (16)$$

wobei $\sigma_{e_i}^2$ die Varianz der i-ten Komponente des Residuumsvektors

$$\underline{e}(t) = \underline{y}(t) - \underline{C} \hat{\underline{x}}(t) \quad (17)$$

ist, der nach Bild 2 die Differenzen zwischen den wahrnehmbaren Größen und ihren Schätzwerten darstellt. Die Matrix \underline{C} ist Teil des internen Modells im Überwacher-Modell. Nach Gl. (16) wird bei einer größeren Varianz des zu Überwachenden Signals y_i auch eine größere Varianz des Schätzfehlers e_i zugelassen.

Es wird in [18] gezeigt, daß das im Abschnitt 2.1 behandelte Modell von Senders für unkorrelierte Anzeigen und vereinfachte Systemdynamiken als Sonderfall der Modelle für die Zustandsüberwachung betrachtet werden kann. Eine experimentelle Validierung der Überwacher-Modelle nach [18] ist bisher für die Zustandsüberwachung nicht erfolgt. Durch Hinzufügen eines Entscheidungselementes zum Überwacher-Modell nach Bild 2 läßt sich eine Fehlerentdeckung nachbilden. Es wird aufgrund von Schwellenüberschreitungen entschieden, ob ein z.B. durch Drifteffekte fehlerhaftes Signal vorliegt oder nicht. Hierfür kann ein Entscheidungselement eingesetzt werden, daß sequentiell das Likelihood-Verhältnis des beobachteten Residuums nach Gl. (17) prüft. Ein derartiges Modell ist experimentell validiert worden [29], [30] .

2.3 Bemerkungen über Aufmerksamkeitsverteilung und Blickbewegungen

Die im letzten Abschnitt behandelte Aufmerksamkeitsverteilung beschreibt modellmäßig das Abtastverhalten des Menschen. Dabei wird im optimaltheoretischen Modell nach Gl. (10) davon ausgegangen, daß eine Verringerung der

Aufmerksamkeitszuwendung gleichbedeutend ist mit einer Erhöhung des Beobachtungsrauschens für die entsprechende wahrnehmbare Größe. Es wird ein Mehrkanalmodell für die Informationsaufnahme angenommen, bei dem die einzelnen Kanäle entsprechend der Aufmerksamkeitsverteilung durch das Beobachtungsrauschen unterschiedlich stark gestört werden. In [31] ist gezeigt worden, daß diese Betrachtungsweise für schnelles Abtasten der wahrnehmbaren Größen identisch ist mit der im Abschnitt 2.1 behandelten Ein-Kanal-Betrachtungsweise. Dann sind auch die Aufmerksamkeitsanteile f_i nach Gl. (10), (11) identisch mit den Anteilen der Verweilzeit nach Gl. (3).

Streng genommen ist kein Verfahren bekannt, das eine experimentelle Überprüfung der theoretisch ermittelten Aufmerksamkeitsverteilung erlaubt. Eine immerhin grobe Analogie liefern Blickbewegungsmessungen. Dabei kann die prozentuale Verteilung der gemittelten Fixationszeiten bezogen auf die einzelnen Felder der gesamten Anzeigenfläche erfaßt werden. Die Anzeigenfläche ist, für die Versuchspersonen unsichtbar, so in einzelne Felder zu unterteilen, daß in diesen jeweils die Änderung einer angezeigten Größe erfolgt. Dies kann bei stark integrierten Anzeigen jedoch zu Schwierigkeiten führen.

Beim Vergleich zwischen Aufmerksamkeitsverteilung und Verteilung der Fixationszeiten ist zu beachten, daß bei den letzteren nicht unterschieden werden kann, ob und mit welcher Gewichtung die angezeigte Größe selbst bzw. ihre erste Ableitung vom Menschen erfaßt werden [19]. Überhaupt liefert die Verteilung der Fixationszeiten keine Information darüber, ob bei der Fixierung der angezeigten Größen diese auch wahrgenommen werden. Andererseits kann die Wahrnehmung zusätzlich das periphere Gesichtsfeld umfassen. Das führt zu einer Mischform zwischen Ein-Kanal- und Mehrkanal-Betrachtungsweise (siehe z.B. [11] und Anhang).

Die Frage, ob bei der Fixierung der angezeigten Größen diese auch wahrgenommen werden, ist in [32] im Hinblick auf Senders' Modell pragmatisch beantwortet worden. Würde bei vielen Fixationen ein Signal y_i nur gesehen und nicht auch wahrgenommen werden, ginge die dem Beobachter subjektiv erscheinende Signalbandbreite und damit schließlich auch die Fixationsfrequenz zurück. Nach Gl. (3) würde dann der Anteil der Verweilzeit für dieses Sig-

nal ebenfalls abnehmen. Daraus kann man schließen, daß sich im Mittel die Verteilung der Fixationszeiten entsprechend der gewünschten Aufmerksamkeitsverteilung einstellt und somit beide wenigstens grob miteinander vergleichbar sind.

2.4 Ein Beispiel : Bewertung von Voranzeigen mit Hilfe des optimaltheoretischen Modells

Ein Beispiel für die Ermittlung der Aufmerksamkeitsverteilung in einer Regelungsaufgabe sei in diesem Abschnitt etwas ausführlicher behandelt. Dabei wird eine Optimierung der Aufmerksamkeitsanteile nach dem Gradientenverfahren vorgenommen. Eine umfassende Darstellung dieses Beispiels erfolgt in [19]; die erste Hälfte der Arbeit entstand während des USA-Aufenthaltes des Autors und ist in [33] veröffentlicht worden.

Es wird die Längsregelung eines schwebenden VTOL-Flugzeugs betrachtet. Die Dynamik der Regelstrecke wird als linearisiert angenommen. Die gesamte Aufmerksamkeit soll voll für die Regelungsaufgabe verfügbar sein. Es wird davon ausgegangen, daß die Einführung einer weiteren Anzeige eine Kompensation zweier gegenläufiger Effekte in der Aufmerksamkeitsverteilung bewirken kann. Voranzeigen verbessern einerseits die Qualität der angezeigten Informationen,

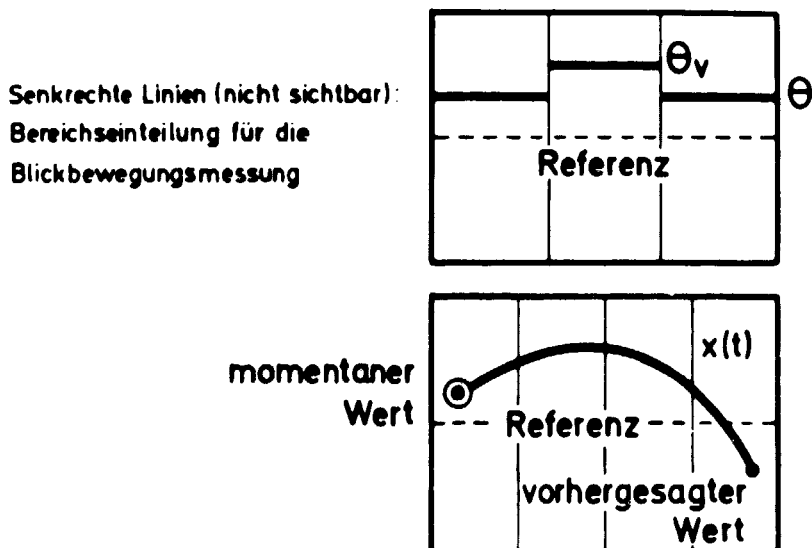


Bild 3 : Nicklage- und Positionsanzeige mit Voranzeigen (nach [19])

erhöhen aber gleichzeitig die Anzahl der Anzeigenelemente. In der vorliegenden Untersuchung wird versucht, den relativen Einfluß verschiedener Voranzeigen nicht durch eine Änderung der maximalen Aufmerksamkeit entsprechend der Anzahl der Anzeigenelemente, sondern ausschließlich durch Änderung der Beobachtungsmatrix \underline{C} zu beschreiben.

Im Bild 3 sind die Nicklage θ , die Position x und ihre vorhergesagten Werte (bei der Position als extrapoliertes Bahnelement) dargestellt. Für eine zunächst durchgeführte theoretische Untersuchung wird angenommen, daß das extrapolierte Bahnelement durch seinen Endpunkt und zwei Zwischenpunkte ausreichend genau beschrieben werden kann. Der Vektor der wahrnehmbaren Größen nach Gl. (7) lautet dann bei Verwendung des Extrapolationsverfahrens für die Berechnung der Voranzeigen :

$$Y = \begin{bmatrix} x \\ u \\ x_{1/3V} \\ x_{2/3V} \\ x_V \\ \theta \\ q \\ \dot{\theta}_V \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1/3\tau_x & 1/18\tau_x^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2/3\tau_x & 2/9\tau_x^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \tau_x & 1/2\tau_x^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \tau_\theta & 1/2\tau_\theta^2 \end{bmatrix}}_{\underline{H}} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

wobei $\tau_\theta = 0,7$ s die Vorhersagezeit für die Nickwinkel-Voranzeige und $\tau_x = 2$ s die maximale Vorhersagezeit für den Endpunkt des extrapolierten Bahnelementes ist. In Gl. (18) wird die menschliche Wahrnehmung der Änderungsgeschwindigkeit durch $u = \dot{x}$ und $q = \dot{\theta}$ berücksichtigt.

Der Vektor auf der rechten Seite von Gl. (18) läßt sich im vorliegenden Falle mit Hilfe einer Matrix \underline{T} , deren Elemente durch die Dynamik der Regelstrecke vorgegeben sind, aus dem Zustandsvektor \underline{x} berechnen. Damit ergibt sich für den Vektor der wahrnehmbaren Größen :

$$\underline{y} = \underline{H} \underline{T} \underline{x} = \underline{C} \underline{x} \quad . \quad (19)$$

Mit Hilfe des optimaltheoretischen Modells werden 13 Anzeigenbedingungen bewertet, die sich hinsichtlich des Umfangs der Änderungsgeschwindigkeits- und der Voranzeige-Information unterscheiden. Aufgrund der Effektivwerte der Position, der Nicklage und der Stellgröße sowie der Aufmerksamkeitsverteilung erfolgt eine Auswahl von 5 Anzeigenbedingungen, die in einer nachfolgenden experimentellen Simulatoruntersuchung weiter betrachtet werden. In Tabelle 1 sind

Tabelle 1 : Auswahl der angezeigten Größen für 5 Anzeigenbedingungen

	A	E	H	K	L
x	1	1	1	1	1
$x_{1/3V}$	0	0	0	1	1
$x_{2/3V}$	0	0	0	1	1
x_V	0	0	1	1	1
e	1	1	1	1	1
e_V	0	1	0	0	1

diese Anzeigenbedingungen erläutert. Bei der Grundbedingung A werden nur die Position x und der Nickwinkel e dargestellt. Beides wird in der Tabelle 1 durch eine "1" gekennzeichnet. Dagegen enthalten die Anzeigen der Bedingung L die vollständige Voranzeige-Information gemäß Bild 3. Bei den übrigen drei Anzeigenbedingungen ist jeweils nur ein Teil der Voranzeige-Information vorhanden.

In der Simulatoruntersuchung werden pro Anzeigenbedingung die Ergebnisse aus je zwei Versuchen mit einem Hubschrauberpiloten und je vier Versuchen mit vier weiteren Versuchspersonen ausgewertet.

Aus dem Vergleich der theoretisch und experimentell ermittelten Effektivwerte der Position ergibt sich, daß eine gute relative Übereinstimmung vorhanden ist, die Ergebnisse des Modells jedoch absolut gesehen viel zu optimistisch sind. Das liegt hauptsächlich daran, daß der Wert für die Aufmerksamkeit in der Regelungsaufgabe bei der theoretischen Untersuchung mit $f_{\text{ges}} = 4$ viel zu hoch angesetzt wurde und keine Wahrnehmungsschwellen berücksichtigt wurden. Dies geschah, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die Grundbedingung A mit denen in der Literatur [34] zu erzielen. Die dort beschriebenen hohen Regelleistungen können jedoch nur unter extrem günstigen Laborbedingungen erreicht worden sein. Die zu hoch angesetzte Aufmerksamkeit f_{ges} und die fehlenden Wahrnehmungsschwellen wirken sich besonders bei den Bedingungen A und E aus, in denen die Position ohne jede Voranzeige dargeboten wurde.

Um eine auch absolut gesehen bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Daten zu erzielen, sind nachfolgend nochmals Modellrechnungen mit veränderten Eingangsdaten durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Die Aufmerksamkeit für die Regelungsaufgabe ist dabei einheitlich auf den in [16] empfohlenen Maximalwert $f_{\text{ges}} = 0,8$ festgesetzt. Außerdem werden jetzt auch die ersten Ableitungen der Voranzeigen als wahrnehmbare Größen berücksichtigt. Diese letzte Änderung führt jedoch zu keiner erheblichen Beeinflussung der Modellergebnisse.

In den Experimenten sind Blickbewegungen gemessen und daraus eine Verteilung der Fixationszeiten ermittelt worden. Dazu ist die gesamte Anzeigenfläche in 7 Bereiche unterteilt worden (siehe Bild 3). Unter der Annahme, die Aufmerksamkeitsverteilung und die Verteilung der Fixationszeiten seien wenigstens grob miteinander vergleichbar, werden die mittleren Fixationszeiten der 4 Versuchspersonen (je zur Hälfte verteilt auf die entsprechende angezeigte Größe und ihre erste Ableitung) als Aufmerksamkeitsanteile f_i für das optimaltheoretische Modell vorgegeben. Die sich ergebenden Effektivwerte der Position bzw. die Aufmerksamkeitsverteilung werden in den dritten Balken der Bilder 4 und 5 dargestellt. Sie werden den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt (Balken 1 : Mittelwert aus je 2 Versuchen des Piloten ; Balken 2 : Mittelwert aus je 4 Versuchen von 4 Versuchspersonen).

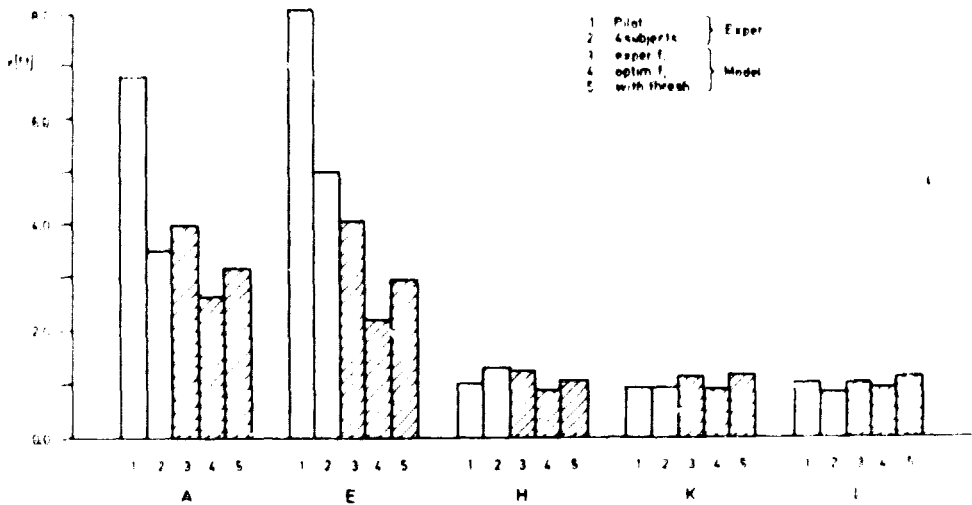


Bild 4 : Effektivwerte der Position bei der Schwebeflugregelung bei den Anzeigenbedingungen A, E, H, K, L (aus [19])

Weiterhin sind in den Bildern 4 und 5 die Ergebnisse aus Modellrechnungen mit optimierten Aufmerksamkeitsanteilen angegeben (Balken 4, 5). Dabei sind im einen Fall wie in der bisherigen Untersuchung insgesamt die Wahrnehmungsschwellen zu Null angenommen (Balken 4), im anderen Fall dagegen entsprechend den Empfehlungen in [16] von Null verschieden gewählt worden (Balken 5). Die Wahrnehmungsschwellen betragen 10 % der maximal zulässigen Werte der wahrnehmbaren Größen, die wiederum um den Faktor 2,5 kleiner sind als die Anzeigendimensionen.

Die Effektivwerte der Position im Bild 4 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen theoretisch und experimentell ermittelten Ergebnissen für die Anzeigenbedingungen H, K und L. Die Bedingung H ergibt, bezogen auf den geringsten Aufwand mit nur einem zusätzlichen Anzeigenelement gegenüber der Grundbedingung A, nämlich dem Endpunkt des extrapolierten Bahnelementes, die beste Leistungsverbesserung. Die Anzeige des gesamten extrapolierten Bahnelementes (K), gegebenenfalls auch noch mit zusätzlicher Voranzeige der Nicklage (L), verändert die Effektivwerte der Position kaum. Bei den Anzeigenbedingungen A und E werden die besten theoretischen Ergebnisse mit von Null verschiedenen Wahrnehmungsschwellen erzielt. Sie sind jedoch immer noch etwas zu optimistisch. Die Ergebnisse im Bild 4 zeigen, daß eine zusätzliche Voranzeige der Nicklage (E)

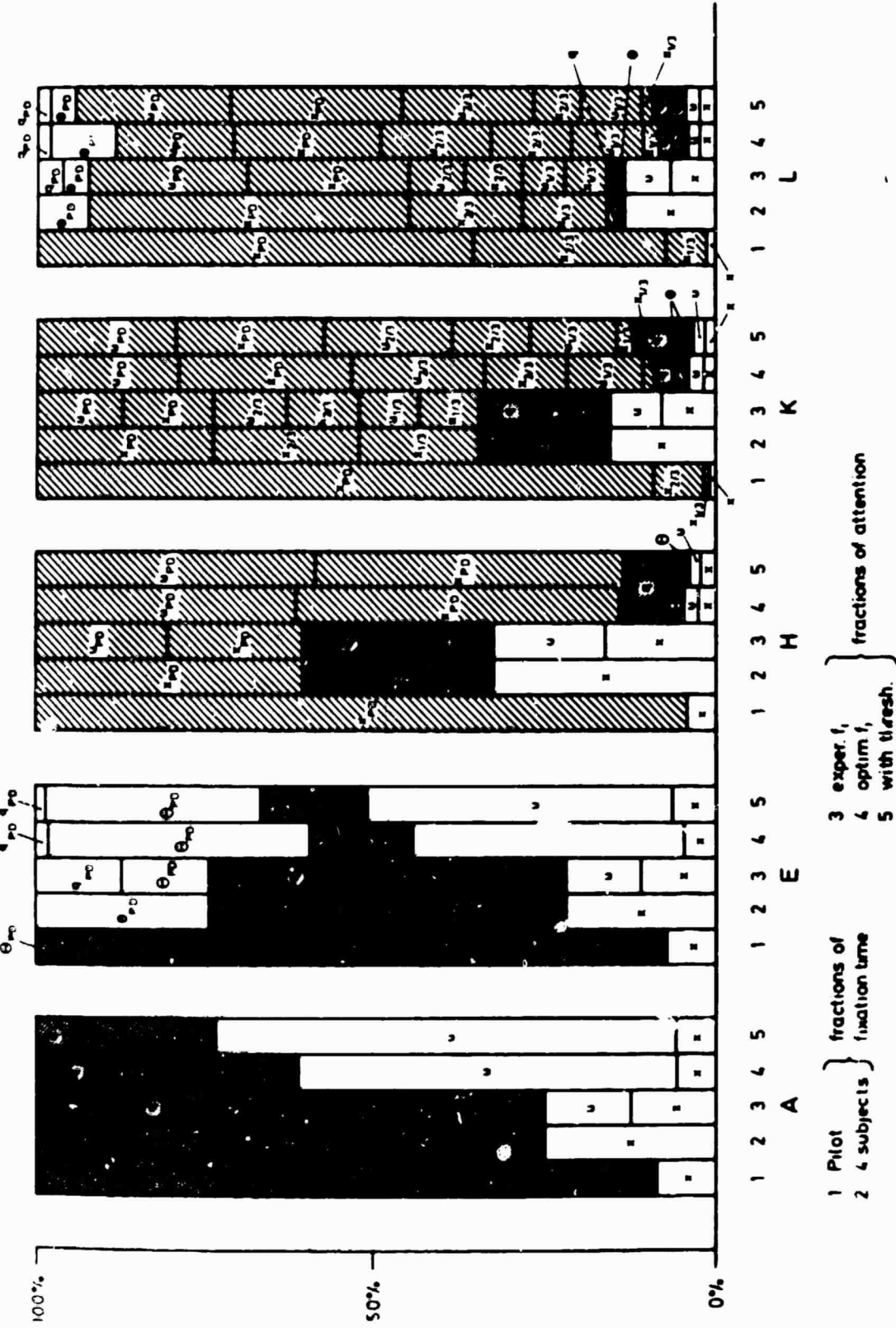


Bild 5 : Relative Verteilung der Fixationszeiten (1,2) bzw. der Aufmerksamkeit (3,4,5) bei den Anzeigenbedingungen A, E, H, K, L [aus [19]]

die Regelleistung eher verschlechtert. Dies stimmt mit dem subjektiven Urteil des Piloten überein, der diese Voranzeige als ablenkend empfand.

Im Bild 5 ist die relative Verteilung der Fixationszeiten bzw. der Aufmerksamkeit dargestellt. Die Höhe der aufeinandergesetzten Balkenstücke entspricht den prozentualen Anteilen der Fixationszeit bzw. der Aufmerksamkeit für die einzelnen wahrnehmbaren Größen. Die Fixationszeiten sind dabei auf 100 % normiert worden. Dies ist für den Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen nützlich. Die Summe der Fixationszeiten erreicht im Experiment nie 100 %, da das Auge der Versuchspersonen teilweise durch Lidschlag geschlossen ist und außerdem die Blickbewegung zeitweilig die interessierende Anzeigenfläche verläßt.

Vergleicht man die Verteilung der Fixationszeiten und der Aufmerksamkeit im Bild 5, so zeigen sich zwischen ihnen offensichtliche Abweichungen. In den Fällen ohne jede Positionsvoranzeige (A,E) beobachten alle Versuchspersonen die Nicklageinformation weit mehr als es vom Modell errechnet wird, da für sie wahrscheinlich die Schätzung der ersten Ableitung aus der Änderung der angezeigten Position zu unsicher ist. Nimmt man entsprechend die erste Ableitung der Position aus dem Vektor der wahrnehmbaren Größen heraus, dann wird auch für das Modell die Nicklageinformation dominierend [19]. Mit Positionsvoranzeige ergibt sich eine bessere Übereinstimmung der Modellergebnisse mit denen des Piloten im Falle des ausschließlich angezeigten Endpunktes des extrapolierten Bahnelementes (H), dagegen eine geringfügig bessere Übereinstimmung mit denen der übrigen Versuchspersonen in den Fällen des vollständig angezeigten extrapolierten Bahnelementes (K,L). Die Positionsvoranzeige wird immer stark beachtet, vor allem der Endpunkt des extrapolierten Bahnelementes.

Insgesamt zeigt die vorliegende Untersuchung, daß die in [16] angegebenen Empfehlungen bezüglich der Aufmerksamkeit in der Regelungsaufgabe und der Wahrnehmungsschwellen zu brauchbaren Leistungsvorhersagen führen. Darüber hinaus wird deutlich, daß unterschiedliche Anzeigenbedingungen ausschließlich durch eine entsprechende Änderung der Beobachtungsmatrix berücksichtigt werden können.

3. Fehlerentdeckung, -diagnose und -korrektur

In den jetzt folgenden beiden Kapiteln 3 und 4 werden überwiegend Entscheidungsprozesse des Menschen behandelt. Dabei wird die Betrachtung im vorliegenden Kapitel auf die Fehlerbehandlung beschränkt. Fehler in Mensch-Maschine-Systemen können von sehr verschiedener Art sein. Plötzliche oder allmähliche Änderungen kontinuierlicher Signale oder das Auftreten diskreter Ereignisse, das z.B. durch Alarmsignale angezeigt wird, sind zu unterscheiden. Die Bandbreite der zu beobachtenden Signale und die Ereignishäufigkeit gehören zu den wesentlichen kennzeichnenden Größen für die jeweilige Aufgabensituation. Ferner ist von Bedeutung, ob die Fehlerbehandlung während des Betriebs oder der Wartung eines Systems durchgeführt wird.

Die Fehlerbehandlung kann in drei Stufen untergliedert werden : Fehlerentdeckung, -diagnose und -korrektur. Eine Übersicht über diese Aufgaben in der Prozeßführung wird in [35] gegeben. Im vorliegenden Bericht wird zunächst die Fehlerentdeckung bei kontinuierlichen Signalen verschiedener Bandbreite behandelt. Bezüglich der Fehlerbehandlung bei Verwendung von Alarmsignalen sei nur darauf hingewiesen, daß Anstrengungen unternommen werden, die Anzahl der Alarmsignale zukünftig auf ein erträgliches Maß zu reduzieren, um eine zu hohe Informationsbelastung und Verwirrung des Menschen zu vermeiden [36].

Ein weiterer Abschnitt dieses Kapitels wird sich mit der Fehlerdiagnose bei Wartungsaufgaben beschäftigen, insbesondere auch mit der Ermittlung der fehlerverursachenden Faktoren. Die Frage wird diskutiert, ob der Mensch hierfür allgemeine, übertragbare Problemlösungsfähigkeiten durch rechnergestütztes Training erwerben kann.

An die Diagnose schließen sich korrigierende Maßnahmen an. Häufig liegt die zu wählende Handlungsalternative eindeutig fest, wenn die Fehlerursache zuvor zweifelsfrei diagnostiziert wurde. Das mag erklären, weshalb der Fehlerkorrektur in der Forschung bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde [35]. Technologische Entwicklungen wie graphische Anzeigen, Mikroprozessoren und dezentrale Regelungs- und Führungssysteme lassen jedoch prinzipiell einen

größeren Spielraum für Handlungsalternativen bei der Fehlerkorrektur zu. Dieser wäre besonders dann wünschenswert, wenn die Fehlerursache nicht zweifelsfrei, sondern nur mit einer Ungewißheit diagnostiziert werden kann. Es erscheint daher lohnend, sich diesem Gebiet zukünftig stärker zuzuwenden. Dabei könnten gleichzeitig die Sicherheit und Leistung von Mensch-Maschine-Systemen gesteigert und eine verbesserte Arbeitsgestaltung erreicht werden.

3.1 Fehlerentdeckung bei kontinuierlichen Signalen

Am Ende von Abschnitt 2.2 wurde ein Überwacher-Modell zur Fehlerentdeckung kurz angesprochen. In diesem Modell [29], [30] werden relativ schnell veränderliche Signale betrachtet, wie sie in der Flugführung auftreten. Die angegebenen Fehlerentdeckungszeiten nehmen teilweise recht große Werte an. Dies kann in Notsituationen äußerst kritisch werden, wenn richtige und schnelle Entscheidungen verlangt werden.

In einer ähnlichen Untersuchung [37] ist am Beispiel von Autopilotausfällen in simulierten Landeanflügen bestätigt worden, daß die Entdeckungszeiten sehr groß werden können. Die Phasenebenendarstellung im Bild 6 veranschaulicht die Abhängigkeit der Entdeckungszeiten von der Gleitpfadabweichung und ihrer ersten Ableitung. Beide Größen befinden sich vor dem Autopilotausfall immer innerhalb der eng schraffierten Fläche, im stationären Zustand nach dem Ausfall aufgrund einer angenommenen reduzierten Wirksamkeit des Autopiloten dagegen innerhalb der weit schraffierten Fläche. In der Simulation wird dieser zweite Zustand durch eine Vergrößerung des Effektivwertes der Vertikalböen um den Faktor 3 erzielt. Entlang der Übergangstrajektorie zwischen beiden Zuständen sind die Zeitpunkte aufgetragen, zu denen die Versuchspersonen den Autopilotausfall entdeckten. Wie die Tabelle im Bild 6 zeigt, werden bei späterem Ausfallzeitpunkt die Entdeckungszeiten kleiner, da ein übliches Instrumentenlandesystem mit zunehmender Anzeigenempfindlichkeit zum Aufsetzpunkt hin verwendet wurde.

Wegen der hohen Entdeckungszeiten wird der verfügbare Entscheidungszeitraum für wirksame Fehlerkorrekturen in komplexen Aufgabensituationen eventuell

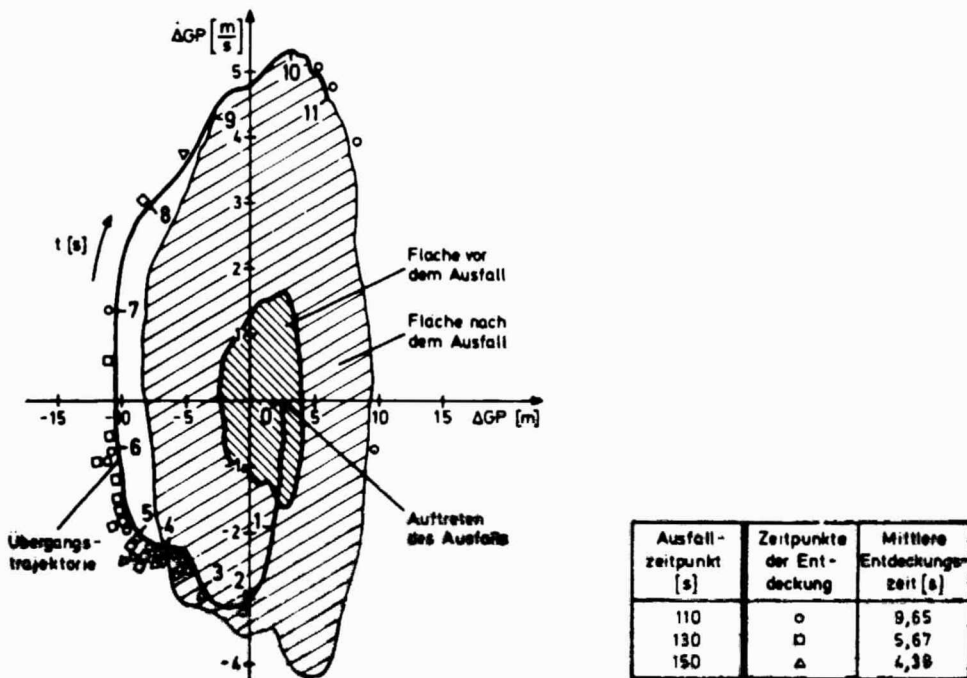


Bild 6 : Phasenebene der Gleitfadabweichung (ΔGP) und Darstellung der Entdeckungszeiten bei Autopilotausfällen (nach [37])

stark eingeschränkt. Um hier nicht gefährliche Situationen entstehen zu lassen, bietet sich die rechnergestützte Fehlerbehandlung an. Die Entwicklung in dieser Richtung erfordert neue Darstellungsverfahren auf der Anzeigenseite zur Reduktion der Entdeckungszeiten und programmierte Diagnosehilfen. Man kann auch daran denken, daß der Rechner dem Menschen bereits fertige Korrekturvorschläge zur Entscheidung anbietet.

Ob die Entdeckungszeiten reduziert werden können, wenn der Mensch aktiv als Regler tätig ist statt nur passiv zu überwachen, ist von Kessel und Wickens untersucht worden [38], [39], [40]. Daran sollen zugleich die scheinbar bestehenden Widersprüche in der Literatur aufgeklärt werden. Im einen Fall [41] zeigen sich nämlich kleinere Entdeckungszeiten bei aktiver Beteiligung als Regler, im anderen Fall [42] dagegen bei passiver Beteiligung als Überwacher.

Im Bild 7 sind diese beiden Betriebsarten schematisch dargestellt. Bei der manuellen Betriebsart ist der Mensch aktiv als Regler tätig, bei der automa-

tischen Betriebsart wird ihm diese Aufgabe dagegen von einem Autopiloten abgenommen. Kessel und Wickens haben Fehler oder Änderungen in den Eigenschaften des dynamischen Systems betrachtet. Für die Fehlerentdeckung werden zwei Grundelemente vorausgesetzt: (1) ein internes Modell des normalen Betriebszustandes des Systems und (2) ein oder mehrere Kanäle, die Informationen über den gegenwärtigen Betriebszustand liefern. Fehler werden entdeckt, wenn eine hinreichend große Abweichung zwischen normalem und gegenwärtigem Betriebszustand festgestellt wird. Hierfür wird eine statistische Entscheidungsregel angenommen.

Das interne Modell über den normalen Betriebszustand des Systems wird vom Menschen durch Training aufgebaut. Es liefert Schätzwerte der Zustandsgrößen und Angaben über deren zu erwartende Variabilität (siehe auch [43]). Die

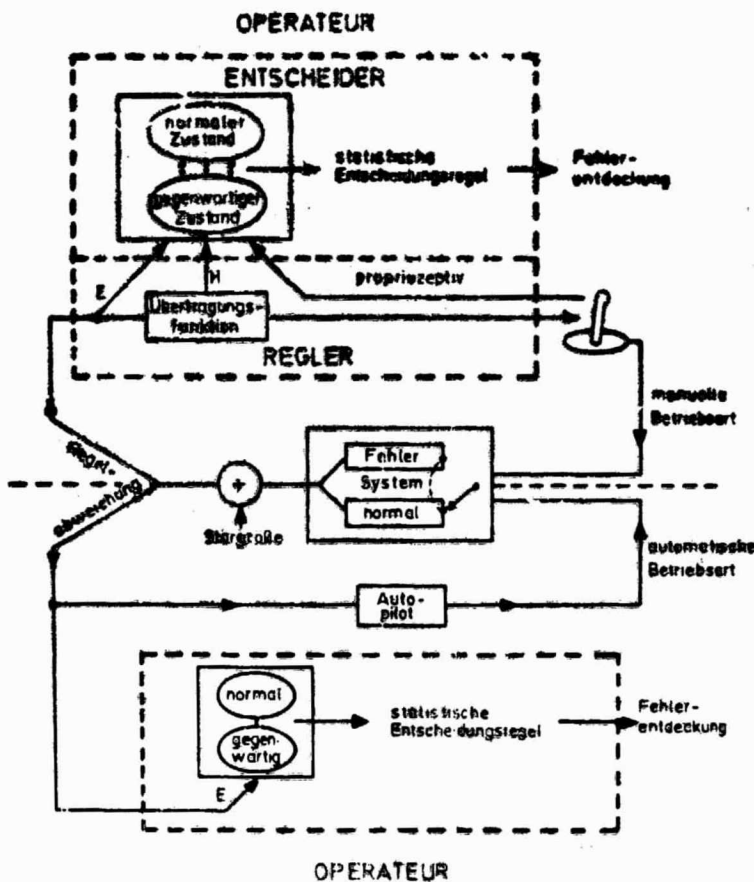


Bild 7: Schematische Darstellung der Fehlerentdeckung durch den Menschen bei manueller (oben) und automatischer (unten) Betriebsart (nach [39])

Güte dieser Schätzwerte hängt von der Genauigkeit und Unveränderlichkeit des internen Modells ab. Es wird angenommen, daß das interne Modell wesentlich stabiler ist, wenn der Mensch aktiv regelt statt passiv zu überwachen. Bei aktiver Regelung sind dem Menschen die Eingangs- Ausgangsbeziehungen des Systems unmittelbar bekannt. Zusätzlich zu der auch bei der Überwachung vorhandenen visuellen Information können hierbei Informationen über den propriozeptiven Kanal als Rückmeldung von Bedienelement und Informationen über das eigene Übertragungsverhalten vom Menschen genutzt werden (siehe Bild 7). Insbesondere wird sich der Mensch beim Auftreten von Fehlern als adaptiver Regler verhalten und entsprechend seine Übertragungsfunktion ändern. Das führt zu veränderten Eigenschaften der Bedienhandlungen und damit auch der propriozeptiven Rückkopplung. Die zusätzlichen Informationskanäle begünstigen also eine schnellere Fehlerentdeckung bei der manuellen Betriebsart.

Diese Aussage ist jedoch nicht unter allen Umständen richtig. Adaptiert der Mensch sich sehr schnell an Systemänderungen, dann wird sich die visuelle Information kaum, die propriozeptive dagegen entsprechend der Adaptation ändern. Der Konflikt zwischen zwei verschiedenen Informationsquellen kann zu einer langsameren Fehlerentdeckung führen. In derselben Richtung wirkt außerdem die Tatsache, daß bei der aktiven Regelung zusätzlich zu der auch bei der reinen Überwachung auszuführenden Wahrnehmungsaufgabe eine motorische Tätigkeit zu leisten ist, die zu einer erhöhten Beanspruchung des Menschen führt.

Offensichtlich hängt es somit sehr stark von der vorliegenden Aufgabensituation ab, ob die Fehlerentdeckung bei der manuellen oder bei der automatischen Betriebsart schneller erfolgt. Im Bild 8 wird gezeigt, daß in den Untersuchungen von Kessel und Wickens die bessere Entdeckungsleistung bei der manuellen Betriebsart erzielt wird. Das Leistungsmaß im Bild 8 wird durch Verknüpfung eines Geschwindigkeitsmaßes (Entdeckungszeit) und eines Genauigkeitsmaßes (Fläche unter der ROC-Kurve) gebildet. Die ROC-Kurven (Receiver Operating Characteristics) werden für Leistungsbetrachtungen in der Signalentdeckungstheorie (siehe z.B. [3], [44]) verwendet, um sowohl richtige Fehlerentdeckungen als auch falsche Alarmer zu erfassen. Die Leistungswerte im Bild 8 werden durch Projektion der Meßwerte auf die Leistungsachse erzielt.

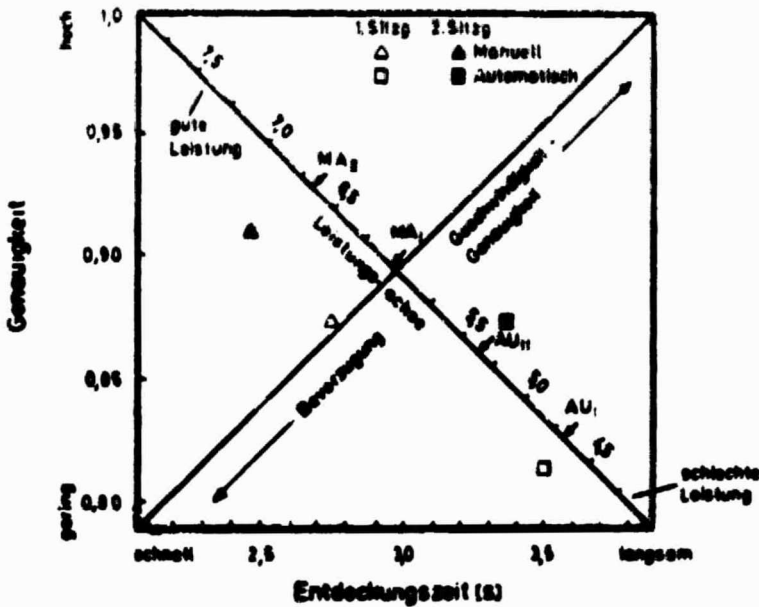


Bild 8 : Einfluß der Betriebsart und der Versuchsbedingung auf die Entdeckungsleistung bei zwei parallelen Regelaufgaben (nach [40])

Die im Bild 8 wiedergegebenen Ergebnisse sind in Versuchen ermittelt worden, in denen zwei einachsige Regelaufgaben parallel durchzuführen sind. In der einen Regelaufgabe sind bei den Betriebsarten "manuell" (MA) und "automatisch" (AU) Änderungen der Systemdynamik zu erkennen. Die Regelstrecke besteht aus einer Parallelschaltung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungssystem mit der Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{1 - \alpha}{s} + \frac{\alpha}{s^2} \quad (20)$$

Es ist eine Nachfolgeregelung auszuführen. Vor dem Auftreten der als Fehler zu erkennenden Systemänderung überwiegt mit $\alpha = 0,3$ der Einfluß des Geschwindigkeitssystems, nach dem Auftreten des Fehlers mit $\alpha = 0,9$ der des Beschleunigungssystems. Die zweite Regelaufgabe ist eine sogenannte kritische Regelaufgabe mit einer instabilen Regelstrecke. Sie wird als Nebenaufgabe immer manuell ausgeführt.

Die Entdeckungszeiten im Bild 8 sind erheblich kürzer als die im Bild 6 gezeigten. Das ergibt sich aus der recht einfachen Regelaufgabe mit relativ

schnellen Signalbewegungen und der entsprechend leichten Erkennbarkeit von Systemänderungen. Die propriozeptive Information kann hierbei gut genutzt werden [38], was zu einer besseren Leistung bei der manuellen Betriebsart führt. Da die Experimente in [41] hinsichtlich dieser Versuchsbedingungen im wesentlichen vergleichbar sind, überrascht es nicht, daß auch dort die manuelle Betriebsart überlegen ist.

Ganz anders ist die Aufgabensituation dagegen, wenn eine relativ komplexe Regelaufgabe mit langsameren Signalbewegungen wie in [37] (siehe Bild 6) oder [42] vorliegt. In beiden Fällen wird die Bahnregelung bei simulierten Landeanflügen betrachtet. Hierbei ist die propriozeptive Information wertlos, da sie offenbar nur innerhalb der ersten 2 s des Adaptationsvorgangs nach Auftreten eines Fehlers zu dessen Entdeckung beiträgt [38]. Daraus kann sich in diesen Fällen eine Überlegenheit der automatischen Betriebsart bei der Fehlerentdeckung ergeben.

Ein weiteres Ergebnis in [40] betrifft den Übungstransfer. Eine Versuchspersonengruppe hat erst bei manueller (MA_I) und dann bei automatischer Betriebsart (AU_{II}) Fehler entdeckt, während eine zweite Gruppe umgekehrt (erst AU_I , dann MA_{II}) vorgegangen ist (siehe Bild 8). Es ergibt sich, daß der Transfer von der automatischen (AU_I) zur manuellen Betriebsart (MA_{II}) sehr gering ist. Offenbar muß für die manuelle Regelung ein eigenes internes Modell unter Nutzung der propriozeptiven Information aufgebaut werden. Hierbei kann das bei der automatischen Betriebsart entwickelte interne Modell kaum genutzt werden. Umgekehrt liegt ein positiver Transfer von der manuellen (MA_I) zur automatischen Betriebsart (AU_{II}) vor. Daraus wird geschlossen, daß ein bei manueller Regelung aufgebautes internes Modell für die nachfolgende Überwachung der automatischen Regelung genutzt werden kann. Diese Aussagen können aus Bild 8 allein nicht abgeleitet werden. Sie sind statistisch abgesichert und in [40] ausführlicher erläutert.

Wie die bisherigen Betrachtungen zeigen, hat die Bandbreite der auf Fehler hin zu beachtenden kontinuierlichen Signale erheblichen Einfluß auf die Entdeckungsleistung. Bisher sind in diesem Abschnitt schnelle Nachfolgeregelungen und relativ langsame Bahnregelungen betrachtet worden, wie sie etwa in der Flugführung auftreten. Wesentlich niedrigere Bandbreiten liegen z.B. in der

Schiffsführung oder in der industriellen Prozeßführung vor. Die Untersuchungen von Greenstein und Rouse [45], [46] befassen sich mit der Fehlerentdeckung in derartigen Aufgabensituationen.

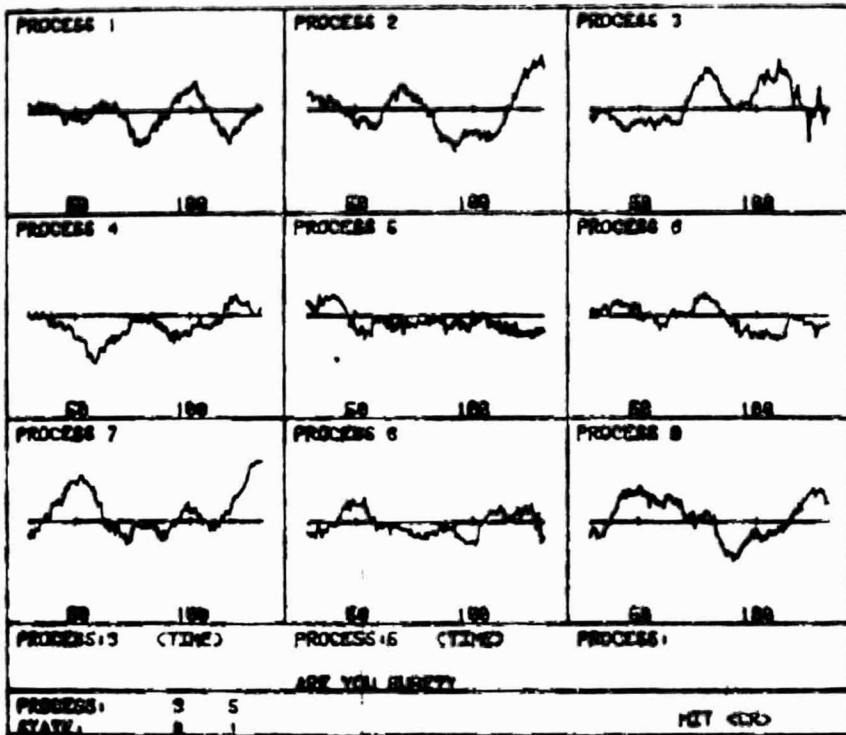


Bild 9: Anzeige zur Fehlerentdeckung in einer Mehrprozeß-Überwachungsaufgabe (aus [46])

Das Bild 9 zeigt die Anzeige, die von den Versuchspersonen zu beobachten ist. Für jeden der neun Prozesse werden 100 Abtastintervalle von je 0,2 s dargestellt. Die Prozesse werden durch identische Systeme zweiter Ordnung ($\omega_0 = 0,75 \text{ rad/s}$, $\zeta = 0,5$) gekennzeichnet, deren Eingangsgrößen weiße Rauschgrößen mit Mittelwert Null und gleicher Varianz sind. Den Meßgrößen am Ausgang der Systeme wird weißes Rauschen überlagert, ebenfalls mit Mittelwert Null und jeweils gleicher Varianz. Ein als Fehler zu erkennendes Störereignis wird dadurch definiert, daß das Rausch-Signal-Verhältnis um 5 % zunimmt. Da mit jeder weiteren Messung eine gleich große Zunahme verbunden ist, wird das Störereignis mit der Zeit immer deutlicher ausgeprägt.

Die Versuchspersonen haben die Aufgabe, diese Störereignisse zu erkennen und die Nummer der für fehlerhaft gehaltenen Prozesse über eine Tastatur einzugeben. Sie können sich dabei beliebig Zeit lassen, werden aber für schnelles Handeln belohnt, für Fehlentscheidungen dagegen bestraft. Eine Rückmeldung informiert die Versuchspersonen über die Richtigkeit ihrer Entscheidungen. Eine "1" kennzeichnet den normalen Betriebszustand, eine "0" entsprechend den Störfall (siehe unteres Feld im Bild 9). Danach werden die Anzeige gelöscht, bei richtig erkannten Störereignissen der normale Betriebszustand wiederhergestellt sowie die Zeitverläufe der Prozesse um 10 Abtastintervalle vorge-rückt und erneut angezeigt.

Anhand eines Ereignisentdeckungsmodells wird die beschriebene Aufgabensituation genauer untersucht. Es wird angenommen, daß der Mensch verschiedene Merkmale aus den beobachteten Zeitverläufen ableitet. Diejenigen Merkmale werden gewählt, die den Unterschied zwischen normalem und gestörtem Betriebszustand möglichst gut kennzeichnen. Die Auswahl ist durch Aussagen der Versuchspersonen gestützt worden. Als Merkmale werden Amplitudenänderungen über größere und kleinere Meßintervalle, Vorzeichenumkehr der Steigung und gleichzeitiges Auftreten von Vorzeichenumkehr mit größerer Amplitudenänderung betrachtet.

Im Ereignisentdeckungsmodell nach [46] wird aus den Merkmalswerten x_{ij} eine lineare Diskriminanzfunktion

$$Y_i = v_{i1} x_{i1} + \dots + v_{im_i} x_{im_i} \quad (21)$$

für den i-ten Prozeß gebildet (über Diskriminanzanalyse siehe z.B. [47]). Die Koeffizienten v_{ij} , $j = 1, 2, \dots, m_i$ werden aufgrund von Erfahrung mit der vorliegenden Aufgabe so festgelegt, daß die Diskriminanzfunktion bestmöglich zwischen normalem und gestörtem Betriebszustand klassifizieren kann.

Mit der Diskriminanzfunktion wird die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür berechnet, daß ein Störereignis aufgetreten ist. Die entsprechende Entscheidung für ein Störereignis wird getroffen, wenn das Likelihood-Verhältnis nach folgender Ungleichung

$$\frac{P(e_i | Y_i)}{1 - P(e_i | Y_i)} > \frac{V_{CR_i} + C_{FA_i}}{V_{H_i} + C_{M_i}} \quad (22)$$

größer ist als das Wert-Kosten-Verhältnis auf der rechten Seite dieser Gl. (22).

V_{CR} ist der Wert für eine richtige Entscheidung "kein Ereignis" (correct rejection), C_{FA} kennzeichnet die Kosten für eine falsche Entscheidung "Ereignis" (falscher Alarm), V_H ist der Wert für eine richtige Entscheidung "Ereignis" (Treffer, hit), und C_M kennzeichnet die Kosten für eine falsche Entscheidung "kein Ereignis" (miss) (siehe auch [3]).

In [46] wird gezeigt, daß das Modell sich so einstellen läßt, daß für die meisten Versuchspersonen eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen bezüglich der Entdeckungsleistung erzielt wird. Statt zu einer binären Entscheidung führt die Fehlererkennung in der Praxis häufig zu einer entsprechenden Aufmerksamkeitsverteilung zwischen den verschiedenen Aufgaben. Ein Modellierungsansatz hierfür wird in [45] beschrieben. Er ist bisher nicht validiert worden.

3.2 Entscheidungsverhalten bei der Fehlerdiagnose

Die Fehlerdiagnose wird vom Menschen in Betriebssituationen, vor allem aber auch in Wartungssituationen durchgeführt. Hierbei werden Problemlösungs- und Entscheidungsstrategien eingesetzt. Als Beispiel werden im vorliegenden Abschnitt die experimentellen und theoretischen Untersuchungen von Rouae [48], [49], [50] behandelt. Es wird von einer zunächst recht abstrakt aussehenden Aufgabe ausgegangen, die jedoch typische Elemente realistischer Fehlerdiagnoseaufgaben enthält. Praktische Anwendungsmöglichkeiten werden diskutiert sowie die Frage, ob der Mensch allgemeine, übertragbare Problemlösungsfähigkeiten durch rechnergestütztes Training erwerben kann.

Das im Bild 10 dargestellte Netzwerk mit 7 x 7 Knoten wird den Versuchspersonen angezeigt. Diese sollen aus einer "0"/"1"-Kombination am Ausgang der Knoten auf der rechten Seite schließen, welcher Knoten fehlerhaft arbeitet.

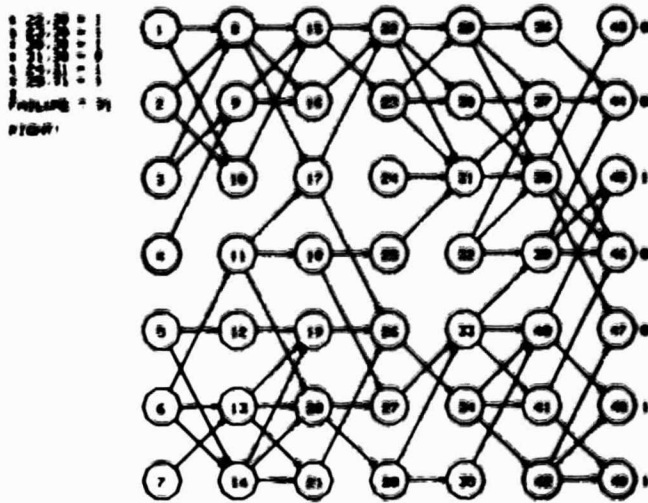


Bild 10 : Netzwerk mit Ausgängen und Protokoll zur Untersuchung des Entscheidungsverhaltens bei der Fehlerdiagnose (aus [48])

Es wird nur ein Fehler angenommen. Jeder Knoten wird am Ausgang eine "1" aufweisen, wenn er fehlerfrei arbeitet und alle Eingänge ebenfalls den Wert "1" besitzen. Auch in vielen realistischen Aufgaben wird bei der Fehlersuche geprüft, ob ein fehlerhaftes Ausgangssignal eines Teilsystems vom Ausfall anderer Teilsysteme verursacht wird. Wie das Protokoll links oben im Bild 10 zeigt, werden von der Versuchsperson verschiedene Verbindungen zwischen einzelnen Knoten ausgetestet. Aufgrund der gesammelten Ergebnisse wird die Entscheidung getroffen, welcher Knoten ausgefallen ist.

In [48] werden Experimente mit selbstbestimmbarer und begrenzter Ausführungszeit (30, 60 oder 90 s) beschrieben. Außerdem wird der Einfluß einer rechnergestützten Anzeigenhilfe untersucht. Hierbei wird unter Verwendung von Beziehungen aus der Graphentheorie ein Algorithmus eingesetzt, der unmögliche Lösungen schrittweise ausblendet, das Netzwerk dadurch vereinfacht und zu einer zunehmenden Übersichtlichkeit der Anzeige führt. Die von der Versuchsperson durch das Austesten einer Verbindung gewonnene Information wird sofort vom Algorithmus zur weiteren Vereinfachung des Netzwerkes genutzt. Als weitere Variable der Untersuchung wird das Training mit oder ohne Anzeigenhilfe betrachtet.

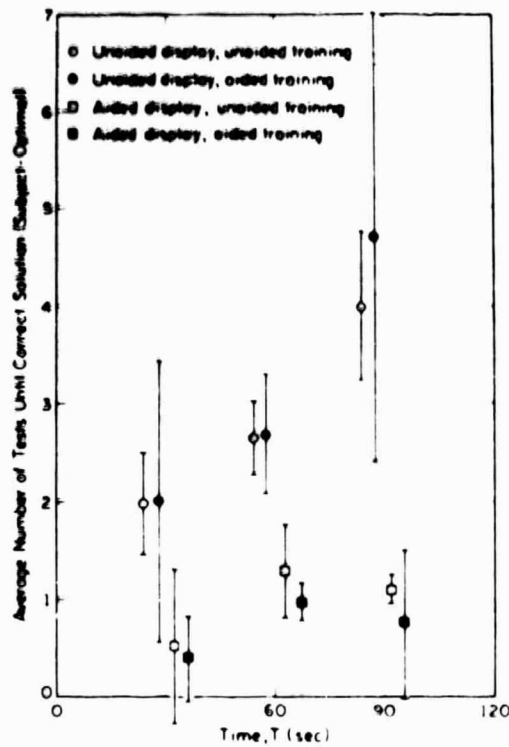


Bild 11 : Durchschnittliche zusätzliche Anzahl der Tests bis zur richtigen Lösung in Abhängigkeit von der verfügbaren Ausführungszeit (aus [48])

Ein Teil der Ergebnisse wird im Bild 11 dargestellt. Dabei bedeutet "Subject - Optimal", daß von der durchschnittlichen Anzahl der Tests, die die Versuchsperson bis zur richtigen Lösung benötigt, die rechnerisch ermittelte optimale Anzahl abgezogen worden ist. Die Ergebnisse zeigen, daß die Anzahl der erforderlichen Tests durch die Anzeigenhilfe verringert wird.

Ein Modell des menschlichen Problemlösungsverhaltens bei der beschriebenen Fehlerdiagnoseaufgabe wird in [49] behandelt. Hierfür werden Konzepte aus der Theorie der unscharfen Mengen (fuzzy sets; siehe z.B. auch [51]) mit heuristischen Annahmen verknüpft. Zunächst wird die Menge der Knoten in zwei Untermengen unterteilt: eine, die wahrscheinlich die fehlerhaften Ausgänge erzeugt (die mögliche Menge) und eine andere, die wahrscheinlich die fehlerhaften Ausgänge nicht erzeugt (die unmögliche Menge).

Es besteht eine unscharfe Vorstellung des Menschen über die Zugehörigkeit der einzelnen Knoten zu einer dieser beiden Mengen. Dementsprechend werden

Zugehörigkeitsfunktionen betrachtet. Die Zugehörigkeit des Knotens i zur unscharfen Menge der möglichen Ursachen eines "0"-Ausgangs des Knotens j (siehe Bild 12) wird definiert als

$$\mu_{ij}^0 = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq a_1 \\ \frac{1}{1 + \left[\frac{x_{ij} - a_1}{a_2} \right]^2}, & x_{ij} > a_1 \end{cases} \quad (23)$$

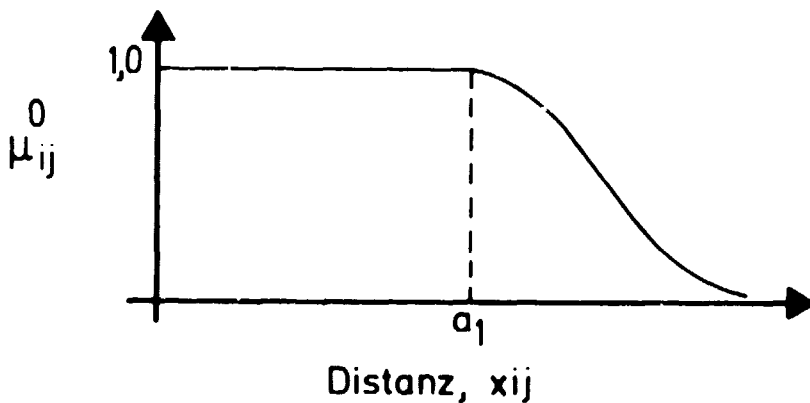


Bild 12 : Zugehörigkeitsfunktion nach Gl. (23)

Entsprechend wird die Zugehörigkeit des Knotens i zur unscharfen Menge der Beiträge zu einem "1"-Ausgang des Knotens j definiert als

$$\mu_{ij}^1 = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq b_1 \\ \frac{1}{1 + \left[\frac{x_{ij} - b_1}{b_2} \right]^2}, & x_{ij} > b_1 \end{cases} \quad (24)$$

Die Größen a_1 , a_2 , b_1 , b_2 sind freie Parameter, während x_{ij} als psychologische Distanz zwischen den Knoten i und j aufgefaßt wird. Durch die Definition der psychologischen Distanz werden die Einflüsse von geographischer und funktioneller Distanz miteinander verknüpft. Die geographische Distanz beschreibt den meßbaren Abstand zwischen zwei Knoten. Die funktionelle Distanz drückt dagegen die funktionelle Abhängigkeit der Knoten voneinander aus. Bei realistischen Systemen können einige Systemkomponenten nahe beieinander lie-

gen, also nur eine kleine geographische Distanz und dennoch überhaupt keine funktionellen Abhängigkeiten voneinander aufweisen und umgekehrt. Im vorliegenden Netzwerk werden die funktionellen Abhängigkeiten unter Verwendung von Beziehungen aus der Graphentheorie ermittelt.

Ausgehend von den Gln. (23) und (24) wird die Zugehörigkeit des Knotens i zur unscharfen Menge der möglichen Ursachen aller bekannten "0"-Ausgänge durch die Schnittmenge

$$\mu_i^0 = \min_i \{ \mu_{ij}^0 \} \quad (25)$$

und die Zugehörigkeit zur unscharfen Menge der Beiträge zu jedem bekannten "1"-Ausgang durch die Vereinigung

$$\mu_i^1 = \max_i \{ \mu_{ij}^1 \} \quad (26)$$

beschrieben. Man bildet die Schnittmenge der möglichen Menge nach Gl. (25) mit dem Komplement der unmöglichen Menge nach Gl. (26), um Knoten mit einer starken Zugehörigkeit zur möglichen Menge und einer schwachen Zugehörigkeit zur unmöglichen Menge zu finden. Damit ergibt sich für die Zugehörigkeit des Knotens i zur unscharfen Menge der möglichen Lösungen:

$$\mu_i = \min \{ \mu_i^0, 1 - \mu_i^1 \} \quad (27)$$

Der Knoten mit dem größten Wert μ_i der Zugehörigkeitsfunktion wird für den nächsten Testschritt ausgewählt, ähnlich wie ihn die Versuchsperson ausführen würde.

Zusätzlich zu diesen Beziehungen aus der Theorie der unscharfen Mengen werden einige heuristische Annahmen verwendet. Zwei davon seien als Beispiele erwähnt. Falls nur ein Knoten funktionell zu allen Knoten mit bekannten "0"-Ausgängen verbunden ist, dann muß dieser Knoten ebenfalls einen "0"-Ausgang aufweisen. Liegt eine lange Kette gleichermaßen möglicher Lösungen vor, dann wird zunächst der Knoten in der Mitte der Kette getestet. Die heuri-

stischen Annahmen sind durch Beobachtung von Versuchspersonen und Diskussion ihrer Strategien ermittelt worden. Das durch Verknüpfung von Heuristik und unscharfen Mengenbeziehungen entwickelte Modell ist mit und ohne Anzeigenhilfe im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen validiert worden.

In einer weiterführenden Untersuchung [50] werden Fehlerdiagnoseaufgaben betrachtet, in denen Rückkopplungen und Redundanz enthalten sind. Damit ergeben sich realistischere Netzwerke wie sie etwa in integrierten Schaltungen vorliegen, die rechnergestützt ausgetestet werden sollen. Gegenwärtig wird die Untersuchungsmethode bei der Reparatur von Automotoren und dem Training von Flugzeugwartungspersonal angewendet. Es wird geprüft, ob sich die mit dem abstrakten Netzwerk erworbenen Problemlösungsfähigkeiten auf derartige realistische Tätigkeiten übertragen lassen.

4. Rechnergestützte Entscheidung und Managementinformationssysteme

Wie im vorangehenden werden auch in diesem Kapitel vorwiegend Entscheidungsprozesse behandelt. Dabei steht im folgenden die Rechnerunterstützung im Vordergrund. Angesichts der neueren Entwicklungen in der Rechnertechnologie werden immer intelligenter Formen der Mensch-Rechner-Kommunikation möglich (siehe auch [2]). Der Rechner wird nicht nur eingesetzt, um dem Menschen Aufgaben abzunehmen, sondern auch, um Aufgaben zu bewerten und zu planen. Große Informationsmengen sind vom Rechner zur Entlastung des Menschen zu verwalten und zu selektieren, d.h. nur die für eine bestimmte Teilaufgabe des Menschen erforderliche Information ist bereitzustellen. Damit ergeben sich Managementinformationssysteme auch für die Fahrzeugführung und die industrielle Prozeßführung ähnlich den in den Wirtschafts- und Verwaltungswissenschaften entwickelten Systemen.

Um den Menschen in schwierigen Aufgabensituationen wirkungsvoll zu entlasten, muß die Rechnerunterstützung selbstständig arbeiten. Wenn der Mensch durch viele Teilaufgaben sehr stark belastet ist, würde ihn eine zusätzliche Entscheidung, wann eine Rechnerunterstützung einsetzen soll, überfordern. Der Rechner muß sich daher selbst unterstützend zuschalten können. Hierfür sind geeignete Kriterien erforderlich. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die zu bearbeitenden Teilaufgaben als "Kunden" oder Forderungen in einer Warteschlange aufgefaßt. Wenn der Ankunftsstrom der zu bedienenden Forderungen eine bestimmte Schwelle überschreitet, schaltet sich der Rechner ein. Ein weiteres Einschaltkriterium wird im zweiten Abschnitt behandelt. Die Rechnerunterstützung soll dabei in Abhängigkeit vom Aktivitätszustand des Menschen erfolgen. Das erfordert die Erfassung und Verarbeitung psychophysiologischer Meßgrößen.

Die beiden letzten Abschnitte beschäftigen sich mit Managementinformationssystemen. Zunächst werden in Ergänzung zum ersten Abschnitt weitere Mensch-Maschine-Managementaufgaben betrachtet. Daran anschließend werden Beziehungen zu Anwendungsbereichen aufgezeigt, in denen nur noch im weitesten Sinne von Mensch-Maschine-Systemen gesprochen werden kann.

4.1 Rechnergestützte Entscheidung als Warteschlangenproblem

Viele Mehrprozeß-Überwachungsaufgaben sind dadurch gekennzeichnet, daß der Mensch bei bestimmten Ereignissen oder Zuständen des beobachteten Systems eine Entscheidung zwischen möglichen Handlungsalternativen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Konsequenzen treffen muß (siehe auch [3], [6]). Nimmt die Anzahl der geforderten Entscheidungen zu, kann der Mensch leicht überfordert werden. Um dies zu verhindern, kann eine Rechnerunterstützung eingesetzt werden.

Als Beispiel werden die Untersuchungen von Chu und Rouse [52], [53], [54] betrachtet. In einer simulierten Flugmanagementaufgabe werden die in den Bildern 13 und 14 dargestellten Anzeigen verwendet. Die Hauptaufgabe der Versuchsperson besteht darin, entlang einer aus Geradenstücken zusammengesetzten Flugbahn zu fliegen. Als Anzeigen stehen eine Karte mit der Flugbahn sowie ein künstlicher Horizont und eine Kurs-, Höhen- und Fahrtanzeige zur Verfügung. Die Hauptaufgabe ist entweder als manuelle Regelungsaufgabe oder, wenn ein Autopilot verwendet wird, als Überwachungsaufgabe auszuführen. Zusätzlich sind sechs Nebenaufgaben zu erledigen. Der Zustand wichtiger Teilsysteme (Navigation, Elektrik, Triebwerke, Kraftstoff, Hydraulik, Kabinentemperatur) ist durch Beobachtung je einer Anzeige zu überwachen (siehe untere Reihe im Bild 13). Wenn ein oder mehrere Zeiger dieser sechs Anzeigen nach unten weisen, wie im Bild 13 für die Triebwerksanzeige veranschaulicht, wird durch jedes dieser Ereignisse eine Handlung erforderlich. Über eine Tastatur soll die Versuchsperson im vorliegenden Fall die Anzeige 3 (Triebwerke) auswählen. Daraufhin erscheint das im Bild 14 dargestellte Anzeigenformat. Es repräsentiert die erste Ebene eines prüflistenähnlichen Ereignisbaums. Die Versuchsperson sucht nach Zweigen, deren Zustand "0" ist, und gibt deren Nummer in die Tastatur ein. Dadurch wird auf die nächste Ebene verzweigt, wieder nach "0" gesucht usw., bis alle Ebenen abgearbeitet sind und das ursprüngliche Anzeigenformat (Bild 13) wieder erscheint.

Die Ereignisse der Teilsysteme treten nach einer Poisson-Verteilung auf. Für die verschiedenen Teilsysteme sind die Ereignisse voneinander unabhängig. Es bestehen feste Prioritäten hinsichtlich der Wichtigkeit der einzelnen Teil-

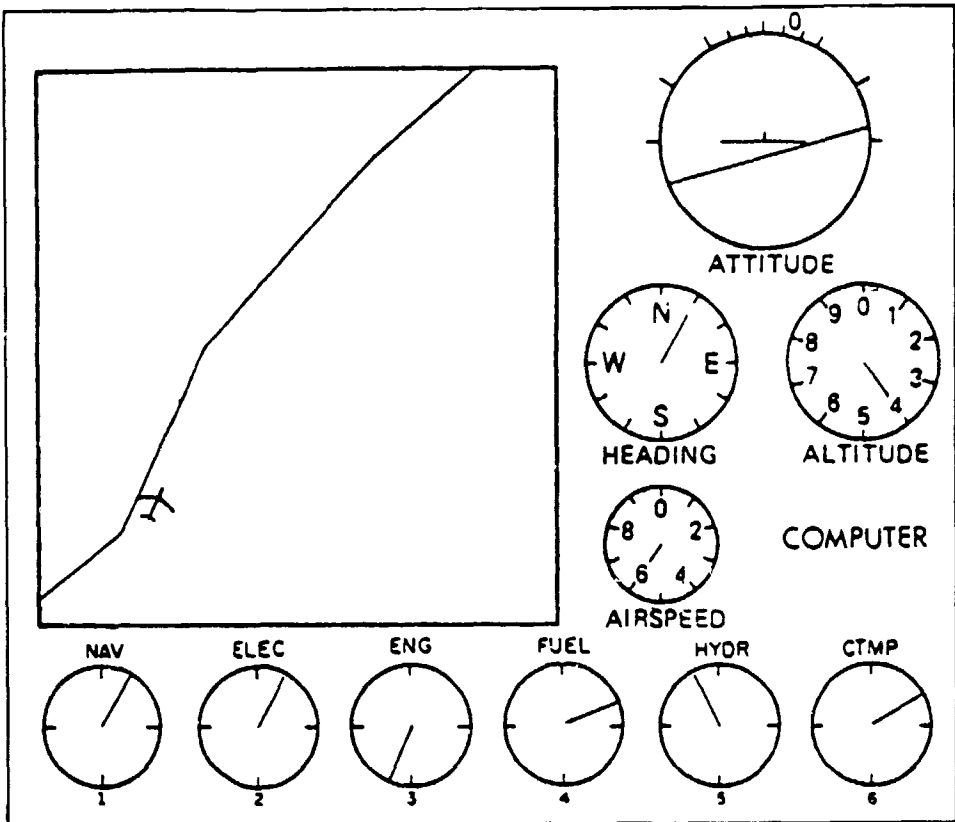


Bild 13 : Anzeigenformat für die Flugmanagementauigabe (aus [54])

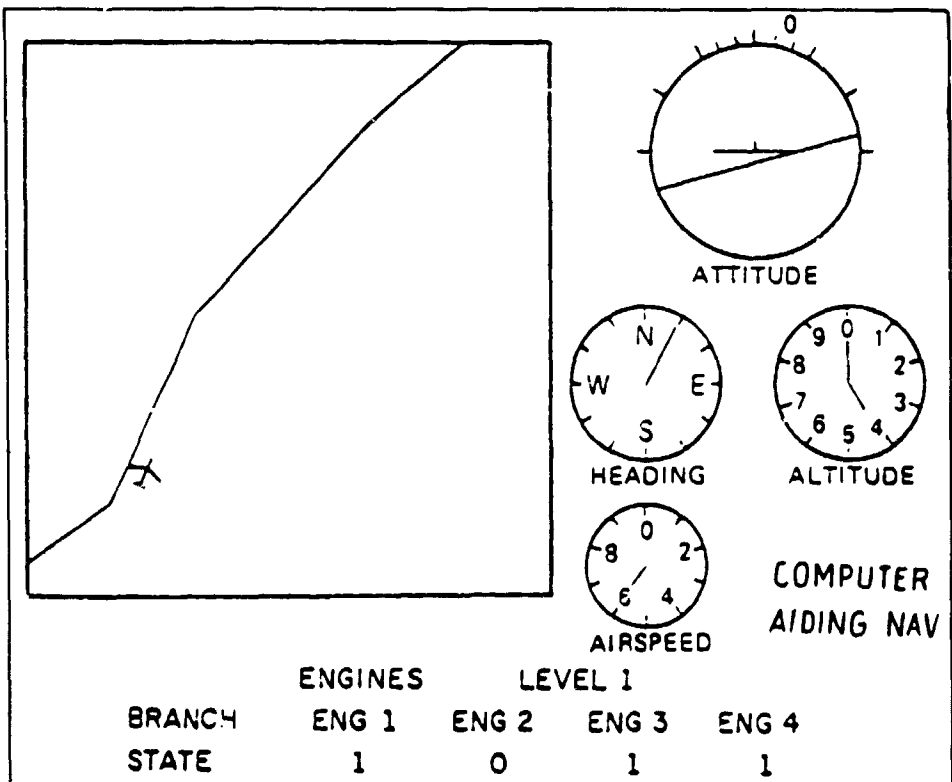


Bild 14 : Anzeigenformat, wenn Pilot auf ein Ereignis im Triebwerkssystem reagiert hat (nach [54])

systeme. Die höchste Priorität wird der Hauptaufgabe zugewiesen ; die Priorität der Nebenaufgaben sinkt von links nach rechts (siehe Bild 13), d.h. das Teilsystem für die Kabinentemperatur hat die geringste Bedeutung. Die Versuchspersonen sind entsprechend instruiert worden, im Falle des Auftretens mehrerer Ereignisse die Teilaufgabe mit einer höheren Priorität zuerst zu bearbeiten.

Zwei verschiedene Ankunftsrate werden in den Experimenten für das Auftreten der Ereignisse vorgegeben. Die niedrige Ankunftsrate beträgt 0,0167 Ereignisse/Sekunde für jedes Teilsystem, die hohe dagegen 0,0333 Ereignisse/Sekunde.

Stehen mehrere Ereignisse gleichzeitig zur Bearbeitung an, dann kann es zu längeren Wartezeiten für einige Teilaufgaben kommen. Außerdem besteht die Gefahr, daß der Mensch hierdurch überfordert wird. Um dies zu vermeiden, wird eine Rechnerunterstützung vorgesehen. Dadurch kann dem Menschen die Bearbeitung jeder der sechs Nebenaufgaben abgenommen werden. Der Rechner schaltet sich selbsttätig nach folgendem Kriterium ein bzw. aus :

$$N = c_1 n_1 + c_2 n_2 + \dots + c_K n_K \quad \begin{cases} \geq M & \text{Rechner ein} \\ \leq m & \text{Rechner aus} \end{cases} \quad (28)$$

wobei im Falle eines Ereignisses $n_i = 1$ und, solange keine Ereignis im i-ten Teilsystem auftritt, $n_i = 0$ ist. Die Kostenfaktoren c_i können entsprechend den vorgegebenen Prioritäten gewählt werden. Der Schwellwert $M > m$ kann mit Hilfe der Warteschlangentheorie berechnet werden.

Eine Konfliktsituation, in der Mensch und Rechner die gleiche Teilaufgabe bearbeiten wollen, muß sicher vermieden werden. Deshalb kündigt der Rechner seine Bereitschaft, eine Teilaufgabe zu übernehmen, durch ein vier Sekunden langes Blinken an. Sind die Anzeigen der sechs Nebenaufgaben zu sehen (Bild 13), dann blinkt das Symbol über der betreffenden Anzeige. Beschäftigt sich der Mensch gerade mit einer anderen Teilaufgabe (Bild 14), dann blinkt eine entsprechende Information im Anzeigenfeld "Computer", z.B. AIDING NAV. Während des Blinkens kann der Mensch die Teilaufgabe selbst übernehmen. Sind die vier Sekunden abgelaufen, dann übernimmt der Rechner. Der Mensch wird hierüber durch einen dunkleren Zeiger in der zugehörigen Anzeige informiert.

Die Flugmanagementaufgabe wird durch ein Warteschlangen-Modell beschrieben. Die Grundlagen der Warteschlangen- oder Bedienungstheorie können in [55], [56], [57] nachgelesen werden. Hier seien nur einige wenige für das weitere Verständnis wesentliche Aspekte angesprochen. Es wird im vorliegenden Beispiel angenommen, daß die einzelnen Teilaufgaben wie Kunden in einer Schlange auf die Bedienung entweder durch den Menschen oder (bei Rechnerunterstützung) durch den Rechner warten. Die Situation ist vergleichbar der an den Kassen eines Einkaufszentrums und wird durch Bild 15 veranschaulicht.

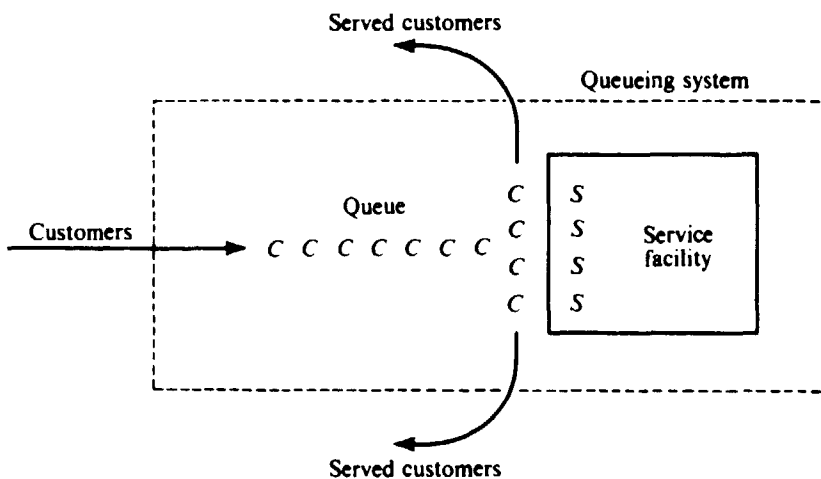


Bild 15 : Einfaches Bedienungssystem (jeder Kunde wird durch ein C gekennzeichnet, jeder Bediener durch ein S) (aus [55])

Ein Zeitdiagramm zur Erläuterung einiger wichtiger Bezeichnungen wird im Bild 16 gezeigt. Darin wird nur ein Bediener angenommen. t_n ist der Ankunftsabstand (interarrival time) zwischen den Kunden C_n und C_{n-1} , x_n die Bedienungszeit (service time) für C_n im Abfertigungsprozeß, w_n die Wartezeit (waiting time) für C_n und s_n die Verweilzeit (system time) für C_n . Die Ankunftsrate (arrival rate) λ wird als Reziprokwert des mittleren Ankunftsabstandes und die Bedienungsrate (service rate) μ als Reziprokwert der mittleren Bedienungszeit definiert.

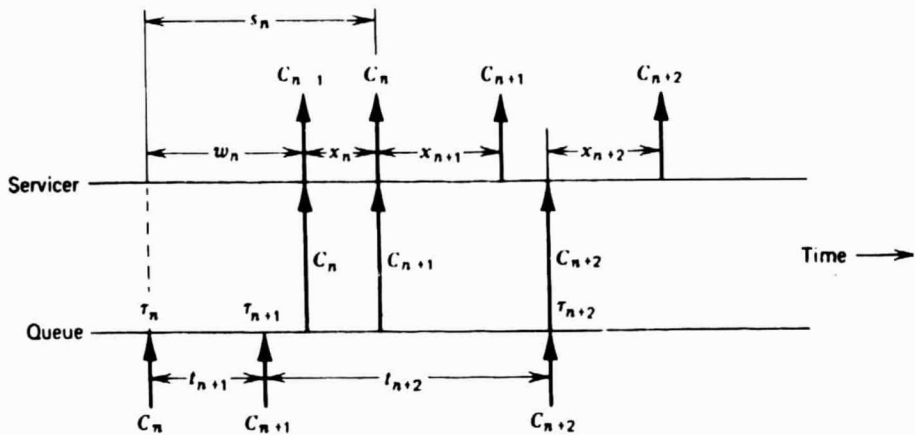


Bild 16 : Zeitdiagramm mit Bezeichnungen für Wartesysteme (aus [56])

Üblicherweise werden Bedienungs- bzw. Wartesysteme durch eine Kurzbeschreibung gekennzeichnet. Als Beispiel sei die Kurzbeschreibung

$$(M/E_K/2) : (PRP/K/K) \quad (29)$$

erläutert. In der linken Klammer werden der Ankunftsprozeß (hier ein Poisson- bzw. Markoff-Prozeß), der Abfertigungsprozeß (hier ein Erlang-Prozeß k-ter Ordnung) und die Anzahl der Bediener (hier 2) angegeben. In der rechten Klammer werden die Wartedisziplin (hier eine Preemptive Resume Priority), die Anzahl der Forderungen (d.h. Kunden bzw. Aufgaben) im Wartesystem (hier K) und die Gesamtanzahl der Population (hier ebenfalls K) charakterisiert. Für die Wartedisziplin ist im vorliegenden Fall der Flugmanagementaufgabe eine Prioritätsstruktur vorgegeben, nach der die manuelle Regelungsaufgabe immer Vortrittsrecht hat (preemptive) und erst nach einem befriedigenden Regelungsergebnis die Bearbeitung der unterbrochenen Nebenaufgaben wiederaufgenommen wird (resume).

Die Rechnerunterstützung in der Flugmanagementaufgabe wird für das durch die Kurzbeschreibung (29) gekennzeichnete Wartesystem ausgelegt. Dabei wird angenommen, daß in Gl. (28) alle Kostenfaktoren $c_1 = c_2 = \dots = c_K = 1$, die untere Schwelle $m = 0$ und die Bedienungsrate des Rechners gleich derjenigen ist, die experimentell für den Menschen ermittelt wurde. Wird eine Bedienerbelegung (auch Verkehrswert, utilization factor oder server occupancy genannt) für den Piloten von $\rho = 0,7$ angestrebt, dann ergibt sich für die Einschalt-

schwelle des Rechners nach Gl. (28) ohne manuelle Regelungsaufgabe $M = 7$ für die niedrige Ankunftsrate und $M = 3$ für die hohe, mit manueller Regelungsaufgabe dagegen $M = 3$ für die niedrige und $M = 1$ für die hohe Ankunftsrate.

In der experimentellen Untersuchung der Flugmanagementaufgabe werden drei unabhängige Variablen betrachtet. Die Ankunftsrate kann niedrig oder hoch sein. Der Automatisierungsgrad der Flugregelungsaufgabe wird durch die Stufen Autopilot, manuelle Regelung und Autopilot mit seltenen Ausfällen vorgegeben. Die Rechnerunterstützung weist ebenfalls drei Stufen auf :

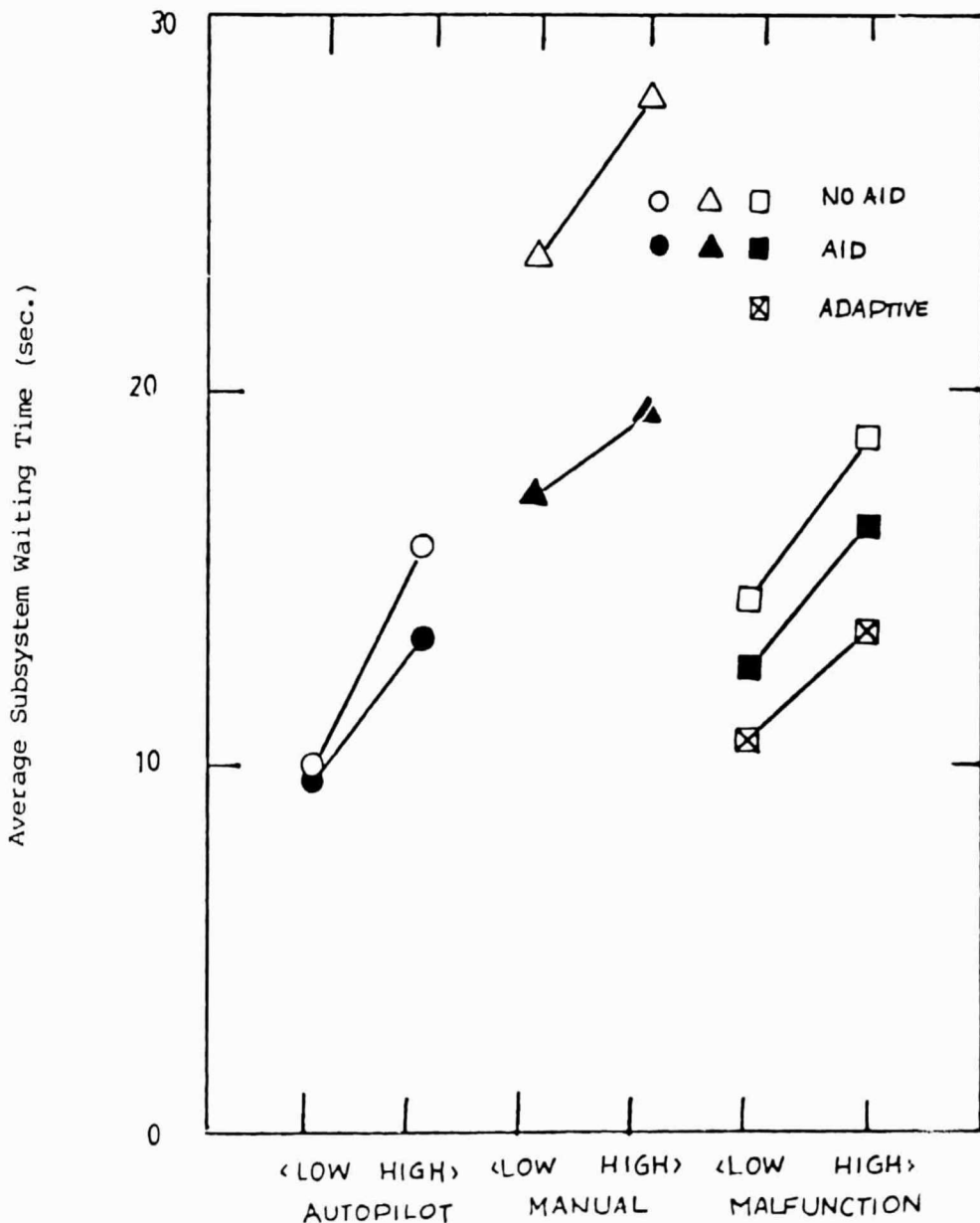


Bild 17 : Mittlere Wartezeit der einzelnen Teilsysteme (aus [54])

keine Unterstützung, Unterstützung mit unveränderlicher Einschaltsschwelle und Unterstützung mit adaptiver Einschaltsschwelle. Im zuletzt genannten Fall wird die Einschaltsschwelle von $M = 3$ auf $M = 1$ herabgesetzt, wenn die Versuchsperson bei Autopilotausfällen manuell übernehmen muß und dadurch kurzzeitig sehr stark beansprucht ist.

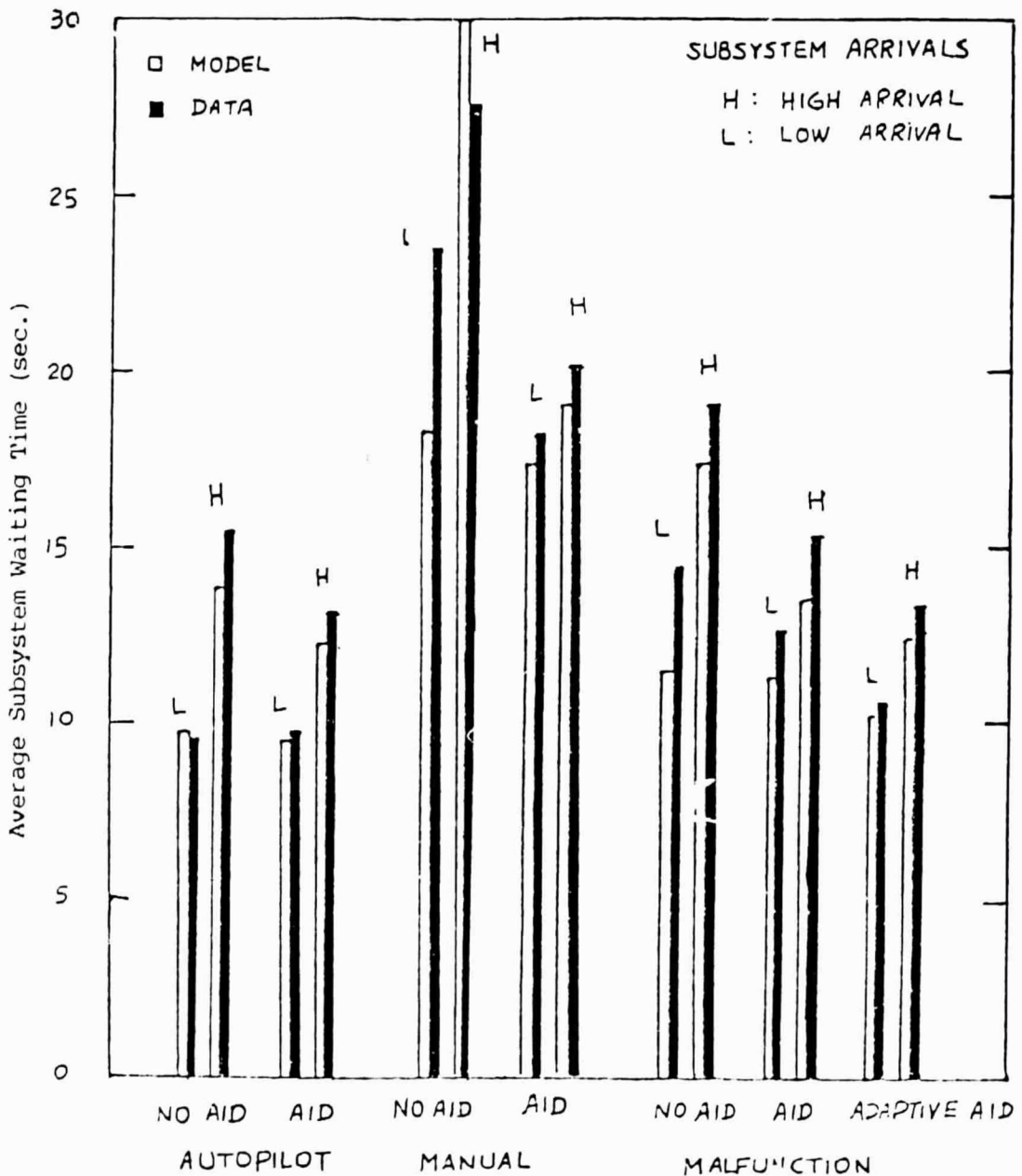


Bild 18 : Vergleich zwischen experimentellen Daten und Modell-Ergebnissen für die mittlere Wartezeit der einzelnen Teilsysteme (aus [54])

Die Ergebnisse im Bild 17 zeigen die mittlere Wartezeit der einzelnen Teilsysteme. Wie zu erwarten, bringt die Rechnerunterstützung den größten Gewinn, wenn die Regelung manuell auszuführen ist. Weitere Ergebnisse der Untersuchung zeigen eine recht hohe Korrelation ($r = 0,95$) zwischen der experimentell ermittelten Bedienerbelegung ρ und der subjektiven Beanspruchungsbewertung, die nach einer ähnlichen Bewertungsskala wie in [58] vorgenommen worden ist. Entsprechend diesem Ergebnis kann man die Bedienerbelegung ρ auch als Beanspruchungsindex für den Menschen auffassen.

Wird die gesamte Flugmanagementaufgabe mit beiden Bedienern, Mensch und Rechner, durch ein Warteschlangen-Modell nachgebildet, dann ergeben sich die im Bild 18 dargestellten Ergebnisse für die mittlere Wartezeit der einzelnen Teilsysteme. Es besteht eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten; die Abweichung ist auf dem 5 %-Niveau nicht signifikant.

4.2 Rechnerunterstützung in Abhängigkeit vom Aktivitätszustand des Menschen

Im letzten Abschnitt wurde eine Rechnerunterstützung behandelt, bei der sich der Rechner selbsttätig ein- und ausschaltet. Der entsprechende Algorithmus ist off-line mit Hilfe warteschlangentheoretischer Berechnungen an die Arbeitsweise des Menschen angepaßt worden. Eine günstigere Aufgabenteilung zwischen Mensch und Rechner ist zu erwarten, wenn sich der Rechner on-line an die jeweilige Beanspruchung des Menschen adaptiert. Da dies wiederum aus den am Anfang des Kapitels genannten Gründen selbsttätig geschehen muß, sind nur wenige Beanspruchungsindikatoren geeignet (siehe auch [58], [59], [60]). Am aussichtsreichsten erscheint es, den Aktivitätszustand des Menschen über psychophysiologische Meßgrößen kontinuierlich zu erfassen.

Als Beispiel werden die Arbeiten von Donchin, Wickens u.a. [61], [62], [63] erläutert, die auch im Rahmen der ARPA-Konferenz "Biocybernetic Applications for Military Systems" vorgestellt wurden (siehe [64]). Es werden ereignisbezogene Gehirnpotentiale (event-related potentials; ERPs) vom Menschen abgeleitet und analysiert. Die aufbereiteten Daten sollen ein momentanes Beanspruchungsmaß ergeben.

Bei den ereignisbezogenen Gehirnpotentialen (ERPs) handelt es sich um typische Gehirnstromaktivitäten, die als Antwort auf die Darbietung bestimmter visueller oder akustischer Ereignisse (z.B. Lichtblitze, Tonimpulse) auftreten. Die Signalform des ERP verändert sich in Abhängigkeit von den physikalischen und informationistischen Eigenschaften des auslösenden Ereignisses. Besonders ausgeprägt ist dies bei der Signalkomponente, die als positive Spannungsspitze etwa 300 ms nach dem Ereignis auftritt und daher P 300 genannt wird. Treten z.B. in einer Serie hoher Töne gelegentlich tiefe Töne auf, dann wird die P 300-Amplitude nach den seltenen tiefen Tönen sehr viel größer. Mit Hilfe einer Diskriminanzfunktion kann zwischen seltenen und häufigen Ereignissen unterschieden werden. Das Diskriminanzmaß zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Ereigniserwartung, die in Ereignisfolgen systematisch variiert worden ist.

Die P 300-Analyse ist bei der Untersuchung manueller Regelungsaufgaben eingesetzt worden [63]. Die Versuchspersonen sollen in einer Ereignisfolge mit zwei unterschiedlich hohen Tönen die Anzahl eines dieser Töne leise für sich zählen. Die mittlere dabei gemessene P 300-Amplitude ist relativ groß. Sie wird kleiner, wenn ein- oder zweidimensionale Regelungsaufgaben parallel von den Versuchspersonen auszuführen sind. Eine Unterscheidung der P 300-Amplituden zwischen ein- und zweidimensionaler Regelung tritt jedoch erst auf, wenn die Ereigniserwartung durch jeweils längere Sequenzen der nicht zu zählenden Töne vor den zu zählenden erhöht wird. Damit ergibt sich ein pauschales Beanspruchungsmaß.

Erste Ansätze zu einer on-line Beanspruchungsmessung sind ebenfalls unternommen worden. Die Störanfälligkeit der Datenerfassung muß jedoch noch weiter reduziert und die Datenaufbereitung verbessert werden, bevor an einen praktischen Einsatz bei der Rechnerunterstützung mit adaptiver Entscheidungsregel gedacht werden kann.

4.3 Kombination mehrerer Tätigkeiten in Mensch-Maschine-Managementaufgaben

In Ergänzung zum Abschnitt 4.1 sollen hier kurz einige weitere Arbeiten erwähnt werden, die sich mit Mensch-Maschine-Managementaufgaben beschäftigen. Der Mensch hat bei diesen Aufgaben häufig mehrere Tätigkeiten in kombinierter

Weise auszuführen. Eine modellmäßige Beschreibung wird entsprechend mehrere mathematische Methoden zu verbinden suchen, ähnlich wie es im Anhang dieses Berichtes angesprochen wird.

Ein rechnergestütztes Entscheidungssystem wird in [65] beschrieben. Es besitzt ähnliche Eigenschaften wie die im Abschnitt 4.1 behandelte Rechnerunterstützung zur Bearbeitung von Ereignissen in Flugzeug-Teilsystemen. Hier wird jedoch eine weitgehend automatische Fehlerbehandlung vorgenommen und der Pilot nur entsprechend über die Aktivitäten der Automatik informiert. In einer weiteren Betriebsart werden die Fehler automatisch erkannt, deren Korrektur aber dem Piloten überlassen. Das rechnergestützte Entscheidungssystem ist im wesentlichen ein Software-Paket. Bei dessen Entwurf sind Methoden der künstlichen Intelligenz angewendet worden.

Ein Modell für kombinierte Überwachungs-, Entscheidungs- und Regelungstätigkeiten für die bodenseitige Führung mehrerer ferngelenkter Flugkörper (remotely piloted vehicles ; RPV) wird in [66], [67] angegeben. Je drei RPVs fliegen im Verband. Sie werden nach einem vorprogrammierten Flugplan automatisch geregelt. Die Aufgabe des Menschen besteht darin, von einer Bodenstation aus die Flugbahn der RPVs zu überwachen und bei größeren lateralen Abweichungen Korrekturkommandos zu geben. Die Haupttätigkeiten des Menschen sind die Überwachung und Entscheidungsfindung, während Regelungstätigkeiten nur sehr selten auftreten.

Das kombinierte Modell zur Beschreibung der RPV-Führung geht von dem optimaltheoretischen Modell aus (siehe Abschnitt 2.2), das durch speziell an das vorliegende Problem angepaßte Überwachungs- und Entscheidungsstrategien ergänzt wird. Zur Beschreibung der Überwachungsstrategien werden die im Kapitel 2 angesprochenen Modelle von Senders, Carbonell und Gai, Curry untersucht. Der zentrale Modellteil zur Informationsverarbeitung erzeugt Schätzwerte der Zustandsgrößen, wie in Bild 2 dieses Berichtes veranschaulicht. Für die Behandlung des Entscheidungsproblems wird eine Entscheidungsbaumdarstellung verwendet (siehe auch [6]), in der Kosten für die einzelnen Handlungsalternativen und die jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. Die Erzeugung von Korrekturkommandos erfolgt nach einem schnelligkeitsopti-

malen Steuergesetz (siehe auch [4]). Die Modellentwicklung ist noch nicht abgeschlossen.

Das gleiche Anwendungsproblem der RPV-Führung wird auch in [68] behandelt. Dabei steht die Modellierung der Entscheidungsfindung im Vordergrund, wobei vor allem die Nutzentheorie angewendet wird. Die grundlegenden Ideen dieser Arbeiten sind bereits in einem anderen FAT-Bericht ([2], Abschnitt 4.3.5) erläutert worden.

Eine weitere Möglichkeit zur Analyse und Modellierung einer komplexen Aufgabensituation besteht darin, nur die Wichtigkeit und die Bearbeitungszeit von Teilaufgaben zu betrachten. Der Mensch muß sich dann für eine Bearbeitungsstrategie entscheiden und die Teilaufgaben nach einem selbstbestimmten Zeitplan sequentiell erledigen. Ein typisches Beispiel ist die Tätigkeit des Fluglotsen. Ein Modell für derartige Tätigkeiten ist in [69] veröffentlicht worden. Die Teilaufgaben erscheinen als verschieden hohe (Wichtigkeit) und verschieden breite Blöcke (erforderliche Bearbeitungszeit) auf je einer eigenen Zeitachse untereinander auf einem Anzeigeschirm. Sie bewegen sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit von links nach rechts und müssen durch einfaches Anwählen nacheinander bearbeitet worden sein, bevor sie am rechten Bildrand verschwinden. Die Dauer der Anwahl entspricht der aufgewendeten Bearbeitungszeit. Die Blöcke werden durch die Bearbeitung schmaler. Bei der Modellierung werden Methoden aus der Graphen- und der Warteschlangentheorie verknüpft.

4.4 Managementinformationssysteme und Gruppenentscheidungsverhalten

Wenn von Managementinformationssystemen (MIS) gesprochen wird, denkt man zunächst weniger an Systeme in der Fahrzeugführung und industriellen Prozeßführung als vielmehr an solche zur Unterstützung des Managers in der Wirtschaft und Verwaltung. In diesen Bereichen kann man heute im weitesten Sinne ebenfalls von Mensch-Maschine-Systemen sprechen, da die MIS auch dort rechnergestützt aufgebaut werden. Der interaktive Dialog mit dem Rechner prägt das Verhalten des Menschen. So gesehen werden sehr verschiedenartige Arbeitstätigkeiten durch den Einsatz von Rechnern einander ähnlicher. Betrachtet man z.B. den Bibliotheksbetrieb [70], dann zeigt sich, daß die hierfür

entwickelten MIS hinsichtlich der Informationswiedergewinnung und Entscheidungsunterstützung trotz unterschiedlichen Zeitmaßstabes durchaus mit denen in Flugmanagementsaufgaben verwandt sind [71]. Weitere Gedanken über die Entscheidungsunterstützung in Mensch-Maschine-Systemen findet man auch in einer Übersichtsarbeit über die Entscheidungstheorie des menschlichen Verhaltens [72].

Zunehmendes Interesse findet die Rechnerunterstützung in Gruppenentscheidungsprozessen. Es wird versucht, ein rationales Entscheidungsverhalten der Mitglieder einer Gruppe durch die Darstellung wichtiger Informationen und durch ein rechnergestütztes Abstimmungssystem zu erreichen [73], [74].

Die Frage ist von Bedeutung, welche Informationen für den Einzel- oder Gruppenentscheidungsprozeß dargestellt werden müssen und wie parallel dargebotene Informationen aufzugliedern sind. Als Beispiel seien die Untersuchungen im Projekt DAISY (Decision Aiding Information System) erwähnt [75], [76], [77]. Die taktischen Entscheidungen des Kommandeurs eines großen Schiffes sollen durch ein Entscheidungshilfssystem unterstützt werden. Dieses arbeitet mit Prüflisten und Warnsystemen, wobei auch künstlich erzeugte Sprache verwendet wird. Das Anzeigenfeld eines Rechnerterminals wird in verschieden große Felder unterteilt, in denen Ein- und Ausgabeinformationen kategorisiert dargestellt werden. Zusätzlich zu verschiedenen Rechnerterminals ist ein großes Projektionssystem vorhanden, so daß eine am Entscheidungsprozeß beteiligte Gruppe gemeinsam besser mit Informationen versorgt werden kann.

5. Schlußbemerkungen und Ausblick

In diesem Bericht sind Experimente und Modelle zur Beschreibung des menschlichen Überwachungs- und Entscheidungsverhaltens in Mensch-Maschine-Systemen vorgestellt worden. Damit sind Tätigkeiten gekennzeichnet, die durch die zunehmende Automatisierung eine immer größere Bedeutung erlangt haben. Der Mensch wird zum Manager, Planer und Störungssucher, während die Routineaufgaben der Automatik überlassen werden.

Die Überwachungs- und Entscheidungsfähigkeiten des Menschen müssen sinnvoll genutzt werden, wenn automatisierte Systeme wirksam und sicher geführt werden sollen. Die reine Überwachung kann eine Unterforderung und Ermüdung des Menschen ergeben. Wird aus einer solchen Situation heraus eine plötzliche Leistungsbereitschaft z.B. durch das Auftreten von Fehlern gefordert, dann kann es zu einem Versagen des Menschen kommen. In den Überwacher-Modellen wird dies bisher nicht ausreichend berücksichtigt. Außerdem mußte zukünftig der Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeitsverteilung und Blickbewegungen näher untersucht werden.

Das Entscheidungs- und Problemlösungsverhalten des Menschen bei der Fehlerbehandlung in Betriebs- und Wartungssituationen kann durch Rechnerunterstützung verbessert werden. Es sind Fehler-Management-Systeme denkbar, bei denen Mensch und Rechner als intelligente Partner zusammenwirken und sich gegenseitig überprüfen. Zur Entlastung des Menschen kann der Rechner selbsttätig handeln. Damit dies in einer an den Menschen angepaßte Weise geschieht, muß der Rechner über ein internes Modell des menschlichen Verhaltens verfügen. Darüberhinaus sollten die Handlungen des Rechners dem Menschen transparent erscheinen.

Die Weiterentwicklung der Managementinformationssysteme zur Unterstützung von Einzel- und Gruppenentscheidungen wird die Mensch-Maschine-Kommunikation weiter verbessern. Hierzu müssen Methoden der Warteschlangen- und Nutzentheorie sowie der künstlichen Intelligenz noch intensiver angewendet werden. Die Anpassung an den psychophysiologischen Zustand des Menschen könnte es ermöglichen, die Belastung des Menschen in gewünschter Weise zu regulieren.

Die Beispiele in diesem Bericht haben den gegenwärtigen Stand der Forschung im wesentlichen umrissen. Wie gezeigt wurde, sind Modelle dabei eine Hilfe, das Verhalten des Menschen genauer zu beschreiben. Außerdem sind sie häufig eine notwendige Voraussetzung für den Entwurf von rechnergestützten Überwachungs- und Entscheidunghilfssystemen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Sheridan, T.B., Johanssen, G. (Eds.) : Monitoring Behavior and Supervisory Control. New York : Plenum Press, 1976.
- [2] Kraiß, K.-F. : Entscheiden und Problemlösen mit Rechnerunterstützung. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim, Bericht Nr. 36, 1978.
- [3] Sheridan, T.B., Ferrell, W.R. : Man-Machine Systems - Information, Control, and Decision Models of Human Performance. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1974.
- [4] Johanssen, G., Boller, H.E., Donges, E., Stein, W. : Der Mensch im Regelkreis - Lineare Modelle. München : Oldenbourg, 1977.
- [5] Neumann, J. : Zur Charakteristik der Überwachungs- und Steuerungstätigkeiten in hochautomatisierten Betrieben. In : Klix, F. u.a. (Hrsg.) : Psychologie in der sozialistischen Industrie. Berlin : VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1971, S. 87-100.
- [6] Bamberg, G., Coenenberg, A.G. : Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. München : Verlag Vahlen, 1977 (2. Aufl.).
- [7] Johanssen, G., Rouse, W.B. : Mathematical Concepts for Modeling Human Behavior in Complex Man-Machine Systems. Human Factors (im Druck).
- [8] Pew, R.W., Baron, S., Feehrer, C.E., Miller, D.C. : Critical Review and Analysis of Performance Models Applicable to Man-Machine Systems Evaluation. Bolt Beranek and Newman Inc., Cambridge, Mass., Rept. No. 3446, 1977.
- [9] Siegel, A.J., Wolf, J.J. : Man-Machine Simulation Models. New York : Wiley, 1969.
- [10] Pritsker, A.A.B., Wortman, D.B., Seum, C.S., Chubb, G.P., Seifert, D.J. : SAINI : Volume I. Systems Analysis of an Integrated Network of Tasks. Wright-Patterson AFB, Ohio, AMRL-TR-73-126, 1974.
- [11] Sanders, A.F. : Some Remarks on Mental Load. In : Moray, N. (Ed.) : Mental Workload - Its Theory and Measurement. New York : Plenum Press, 1979, pp. 41-77.
- [12] Senders, J.W. : The Human Operator as a Monitor and Controller of Multidegree of Freedom Systems. IEEE Trans. Human Factors in Electronics, Vol. HFE-5 (1964), pp. 2-5.

- [13] Carbonell, J.R. : A Queueing Model of Many-Instrument Visual Sampling. IEEE Trans. Human Factors in Electronics, Vol. HFE-7 (1966), pp. 157-164.
- [14] Carbonell, J.R., Ward, J.L., Senders, J.W. : A Queueing Model of Visual Sampling - Experimental Validation. IEEE Trans. Man-Machine Systems, Vol. MMS-9 (1968), pp. 82-87.
- [15] Kleinman, D.L., Baron, S., Levison, W.H. : An Optimal Control Model of Human Response. Part I: Theory and Validation. Automatica, Vol. 6 (1970), pp. 357-369.
- [16] Curry, R.E., Kleinman, D.L., Hoffman, W.C. : A Design Procedure for Control/Display Systems. Human Factors, Vol. 19 (1977), pp. 421-436.
- [17] Johannsen, G. : Auslegung von Flugführungsanzeigen mit Hilfe des optimaltheoretischen Modells für den Menschen als Regler. In : Jahrbuch der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR), Köln, 1978, S. 149-1 - 149-14.
- [18] Kleinman, D.L., Curry, R.E. : Some New Control Theoretic Models for Human Operator Display Monitoring. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-7 (1977), pp. 778-784.
- [19] Johannsen, G., Govindaraj, T. : Optimal Control Model Predictions of System Performance and Attention Allocation and Their Experimental Validation in a Display Design Study. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. (zur Veröffentlichung eingereicht).
- [20] Grunwald, A.J., Merhav, S.J. : Vehicular Control by Visual Field Cues - Analytical Model and Experimental Validation. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-6 (1976), pp. 835-845.
- [21] Wewerinke, P.H. : A Theoretical and Experimental Analysis of the Outside World Perception Process. Proc. 14th Annual Conf. Manual Control, NASA Conf. Publ. 2060, 1978, pp. 535-555.
- [22] Stein, W. : Zur Aufgabenteilung Mensch-Rechner bei der Führung komplexer technischer Systeme. In : Bücherei der Ortung und Navigation, Nr. 116, Bd. 1. Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation (DGON), Düsseldorf, 1978.
- [23] Baron, S., Levison, W.H. : Display Analysis with the Optimal Control Model of the Human Operator. Human Factors, Vol. 19 (1977), pp. 437-457.
- [24] Baron, S., Levison, W.H. : An Optimal Control Methodology for Analyzing the Effects of Display Parameters on Performance and Workload in Manual Flight Control. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-5 (1975), pp. 423-430.

- [25] Levison, W.H. : A Model for Mental Workload in Tasks Requiring Continuous Information Processing. In : Moray, N. (Ed.) : Mental Workload - Its Theory and Measurement. New York : Plenum Press, 1979, pp. 189-218.
- [26] Hoffman, W.C., Curry, R.E., Kleinman, D.L., Hollister, W.M., Young, L.R. : Display/Control Requirements for VTOL Aircraft. Aerospace Systems, Inc., Burlington, Mass., ASI-TR-75-26 (NASA CR-145026), 1975.
- [27] Kleinman, D.L. : Solving the Optimal Attention Allocation Problem in Manual Control. IEEE Trans. Automat. Cont., Vol. AC-21 (1976), pp. 813-822.
- [28] Curry, R.E., Hoffman, W.C., Young, L.R. : Pilot Modeling for Manned Simulation, Vol. I ; Doyle, K.M., Hoffman, W.C. : Pilot Modeling for Manned Simulation, Vol. II (Program User's Manual). Wright-Patterson AFB, Ohio, AFFDL-TR-76-124, 1976.
- [29] Curry, R.E., Gai, E.G. : Detection of Random Process Failures by Human Monitors. In : Sheridan, T.B., Johanssen, G. (Eds.) : Monitoring Behavior and Supervisory Control. New York : Plenum Press, 1976, pp. 205-220.
- [30] Gai, E.G., Curry, R.E. : A Model of the Human Observer in Failure Detection Tasks. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-6 (1976), pp. 85-94.
- [31] Kleinman, D.L., Curry, R.E. : An Equivalence between Two Representations for Human Attention Sharing. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-6 (1976), pp. 650-652.
- [32] Moray, N. : Attention, Control, and Sampling Behaviour. In : Sheridan, T.B., Johanssen, G. (Eds.) : Monitoring Behavior and Supervisory Control. New York : Plenum Press, 1976, pp. 221-244.
- [33] Johanssen, G., Govindaraj, T. : Analysis of a VTOL Hover Task with Predictor Displays Using an Optimal Control Model of the Human Operator. Proc. 14th Annual Conf. Manual Control, NASA Conf. Publ. 2060, 1978, pp. 237-251.
- [34] Baron, S., Kleinman, D.L. : Prediction and Analysis of Human Performance in a VTOL Hover Task. Proc. 7th Annual Conf. Manual Control, NASA SP-281, 1972, pp. 247-256.
- [35] Lees, F.P., Sayers, B. : The Behaviour of Process Operators under Emergency Conditions. In : Sheridan, T.B., Johanssen, G. (Eds.) : Monitoring Behavior and Supervisory Control. New York : Plenum Press, 1976, pp. 331-341.

- [36] Veitengruber, J.E. : Design Criteria for Aircraft Warning, Caution, and Advisory Alerting Systems. *J. Aircraft*, Vol. 15 (1978), pp. 574-581.
- [37] Johannsen, G., Pfendler, C., Stein, W. : Human Performance and Workload in Simulated Landing-Approaches with Autopilot-Failures. In : Sheridan, T.B., Johannsen, G. (Eds.) : *Monitoring Behavior and Supervisory Control*. New York : Plenum Press, 1976, pp. 83-95.
- [38] Wickens, C.D., Kessel, C. : The Effects of Participatory Mode and Task Workload on the Detection of Dynamic System Failures. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-9 (1979), pp. 24-34.
- [39] Wickens, C.D., Kessel, C. : The Effects of Participatory Mode and Task Workload on the Detection of Dynamic System Failures. *Proc. 13th Annual Conf. Manual Control*, Massachusetts Institute of Technology, 1977, pp. 126-135.
- [40] Kessel, C., Wickens, C.D. : The Internal Model : A Study of the Relative Contribution of Proprioception and Visual Information to Failure Detection in Dynamic Systems. *Proc. 14th Annual Conf. Manual Control*, NASA Conf. Publ. 2060, 1978, pp. 85-97.
- [41] Young, L.R. : On Adaptive Manual Control. *Ergonomics*, Vol. 12 (1969), pp. 635-674.
- [42] Ephrath, A.R., Curry, R.E. : Detection by Pilots of System Failures during Instrument Landings. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-7 (1977), pp. 841-848.
- [43] Veldhuyzen, W., Stassen, H.G. : The Internal Model -What Does It Mean in Human Control ? In : Sheridan, T.B., Johannsen, G. (Eds.) : *Monitoring Behavior and Supervisory Control*. New York : Plenum Press, 1976, pp. 157-171.
- [44] Koethe, H. : Die Signalentdeckungstheorie (SDT) als methodisches Hilfsmittel für anthropotechnische Untersuchungen. *Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim, AT Mitteilung Nr. 1/73*, 1973.
- [45] Rouse, W.B., Greenstein, J.S. : A Model of Human Decision Making in Multi-Task Situations : Implications for Computer Aiding. *Proc. IEEE Intern. Conf. Cybernetics and Society*, 1976, pp. 425-433.
- [46] Greenstein, J.S., Rouse, W.B. : A Model of Human Event Detection in Multiple Process Monitoring Situations. *Proc. 14th Annual Conf. Manual Control*, NASA Conf. Publ. 2060, 1978, pp. 663-675.
- [47] Afifi, A.A., Azen, S.P. : *Statistical Analysis - A Computer Oriented Approach*. New York : Academic Press, 1972.

- [48] Rouse, W.B. : Human Problem Solving Performance in a Fault Diagnosis Task. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-8 (1978), pp. 258-271.
- [49] Rouse, W.B. : A Model of Human Decisionmaking in a Fault Diagnosis Task. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-8 (1978), pp. 357-361.
- [50] Rouse, W.B. : A Model of Human Decisionmaking in Fault Diagnosis Tasks that Include Feedback and Redundancy. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-9 (1979), pp. 237-241.
- [51] Rödder, W., Zimmermann, H.J. : Analyse, Beschreibung und Optimierung von unscharf formulierten Problemen. Z. Operations Research, Bd. 21 (1977), S. 1-18.
- [52] Chu, Y.-Y., Rouse, W.B. : Optimal Adaptive Allocation of Decision Making Responsibility between Human and Computer in Multi-Task Situations. Proc. IEEE Intern. Conf. Cybernetics and Society, 1977, pp. 168-175.
- [53] Chu, Y.-Y., Rouse, W.B. : Pilot Decision Making in a Computer-Aided Flight Management Situation. Proc. 14th Annual Conf. Manual Control, NASA Conf. Publ. 2060, 1978, pp. 677-690.
- [54] Chu, Y.-Y. : Adaptive Allocation of Decision Making Responsibility between Human and Computer in Multi-Task Situations. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, Rept. No. T-66 (CSL), 1978.
- [55] Hillier, F.S., Lieberman, G.J. : Operations Research. San Francisco : Holden-Day, 1974 (2nd Edition).
- [56] Kleinrock, L. : Queueing Systems. Vol. I/II. New York : Wiley, 1975/1976.
- [57] Krampe, H., Kubát, J., Runge, W. : Bedienungsmodelle. München : Oldenbourg, 1973.
- [58] Pfendler, C., Johannsen, G. : Beiträge zur Beanspruchungsmessung und zum Lernverhalten in simulierten S10L-Anflügen. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim, Bericht Nr. 30, 1977.
- [59] Wierwille, W.W., Williges, R.C. : Survey and Analysis of Operator Workload Assessment Techniques. Systemetrics, Inc., Blacksburg, Virginia, Rept. No. S-78-101, 1978.
- [60] Moray, N. (Ed.) : Mental Workload - Its Theory and Measurement. New York : Plenum Press, 1979.
- [61] Squires, K.C., Wickens, C., Squires, N.C., Donchin, E. : The Effect of Stimulus Sequence on the Waveform of the Cortical Event-Related Potential. Science, Vol. 193 (1976), pp. 1142-1146.

- [62] Squires, K., Petuchowski, S., Wickens, C., Donchin, E. : The Effects of Stimulus Sequence on Event Related Potentials : A Comparison of Visual and Auditory Sequences. *Percept. Psychophys.*, Vol. 22 (1977), pp. 31-40.
- [63] Wickens, C.D., Israel, J., Donchin, E. : The Event Related Cortical Potential as an Index of Task Workload. *Proc. Human Factors Soc. 21st Annual Meeting*, 1977, pp. 282-286.
- [64] Gomer, F.E., Youngling, E.W. : Electrophysiological Applications to Human Factors Problems in Military Settings. *Human Factors Soc. Bulletin*, Vol. 21 (1978) 8, pp. 1-3.
- [65] Chien, R.T. : On the Importance of Program Intelligence to Advanced Automation in Flight Operations. *Wright-Patterson AFB, Ohio, AFAL-TR-77-20*, 1977.
- [66] Muralidharan, R., Baron, S. : Combined Monitoring, Decision and Control Model for the Human Operator in a Command and Control Task. *Proc. 14th Annual Conf. Manual Control, NASA Conf. Publ. 2060*, 1978, pp. 647-662.
- [67] Miller, D.C., Feehrer, C.E., Muralidharan, R., Pew, R.W., Baron, S. : Development of Human Performance Models for Man-Machine System Simulation. *Bolt Beranek and Newman Inc., Cambridge, Mass.*, Rept. No. 3739, 1978.
- [68] Steeb, R., Chen, K., Freedy, A. : Adaptive Estimation of Information Values in Continuous Decision Making and Control of Remotely Piloted Vehicles. *Perceptronics, Inc., Woodland Hills, Calif.*, Rept. No. PATR-1037-77-8, 1977.
- [69] Tulga, M.K. : Dynamic Decision Making in Multi-Task Supervisory Control : Comparison of an Optimal Algorithm to Human Behavior. *Sc.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Man-Machine Systems Laboratory*, 1978.
- [70] Rouse, S.H., Rouse, W.B. : Design of a Model-Based Online Management Information System for Interlibrary Loan Networks. *Inform. Proc. Management*, Vol. 15 (1979), pp. 109-122.
- [71] Rouse, W.B., Neubauer, H.L. : Issues in the Design of Management Information Systems : A Comparison of Two Very Different Domains. *Proc. Intern. Conf. Cybernetics and Society, Tokyo, Japan*, 1978.
- [72] Slovic, P. : Behavioral Decision Theory. *Ann. Rev. Psychol.*, Vol. 28 (1977), pp. 1-39.
- [73] Rouse, W.B., Sheridan, T.B. : Computer-Aided Group Decision Making : Theory and Practice. *Technol. Forecast. Social Change*, Vol. 7 (1975), pp. 113-126.

- [74] Sheridan, T.B. : Community Dialog Technology. Proc. IEEE, Vol. 63 (1975), pp. 463-475.
- [75] Morgan, H.L. : DAISY - An Applications Perspective. University of Pennsylvania, Philadelphia, Dept. Decision Sciences, Rept. No. 75-11-03, 1975.
- [76] Buneman, O.P., Morgan, H.L., Zisman, M.D. : Display Facilities for Decision Support - The DAISY Approach. University of Pennsylvania, Philadelphia, Dept. Decision Sciences, Rept. No. 76-10-05, 1976.
- [77] Hurst, Jr., E.G. (Ed.) : Description of the Wharton/ODA System (Operational Decision Aiding). University of Pennsylvania, Philadelphia, Dept. Decision Sciences, Rept. No. 77-11-02, 1977.

ANHANG

MATHEMATICAL CONCEPTS FOR MODELING HUMAN BEHAVIOR IN COMPLEX MAN-MACHINE SYSTEMS *)

Gunnar Johannsen, Research Institute for Human Engineering (FAT),
Wachtberg-Werthhoven, F.R. Germany and William B. Rouse, University of
Illinois at Urbana-Champaign

Many useful mathematical models for manual control, monitoring, and decision-making tasks in man-machine systems have been designed and successfully applied. However, critical comments have occasionally been made, mainly by practitioners concerned with the design of complex man-machine systems. They blame especially models which seem to explain only data from abstract subtask experiments designed particularly for these models.

In this review paper, an initial approach to bridging the gap between these two perspectives of models is presented. From the manifold of possible human tasks, a very popular baseline scenario has been chosen, namely car driving. A hierarchy of human activities is derived by analyzing this task in general terms. A structural description leads to a block diagram and a time-sharing computer analogy.

The range of applicability of existing mathematical models is considered with respect to the hierarchy of human activities in real complex tasks. Also, other mathematical tools so far not often applied to man-machine systems are discussed. The mathematical descriptions at least briefly considered here include utility, estimation, control, queueing, and fuzzy set theory as well as artificial intelligence techniques. Some thoughts are given as to how these methods might be integrated and how further work might be pursued.

INTRODUCTION

When designing such systems as automobiles, aircraft, power plants, and management information systems, it is very important to understand the human's role in the system and design the man-machine interface appropriately. The engineering approach, which leads one to represent the machine in terms of differential equations, networks, etc., suggests that the human can also be represented as a set of mathematical equations for the purpose of systems analysis and design. Thus, considerable effort has been devoted to developing mathematical models of human behavior.

*) Dieser Aufsatz ist zur Veröffentlichung in der Zeitschrift "Human Factors" angenommen (z.Zt. im Druck).

Despite the criticisms of those who find the analogy between humans and equations unpalatable, many models have been reasonably successful within the limited domains that they addressed. In fact, if we accept the premise that human behavior mainly reflects the external environment [Newell and Simon, 1972], then it is not surprising that man and machine can be described in similar terms. Quite simply, since the human adapts his behavior to the machine, his actions become somewhat machine-like. (Of course, from a design point of view, one tries to avoid requiring the human to adapt to the machine to any extreme extent.)

On the other hand, the success of models in limited domains has not had substantial impact in realistically complex domains. For example, manual control models are not everyday tools for the aircraft designer. Further, manual control models capture only a small portion of the total task of driving an automobile. For these reasons, designers have been known to claim that mathematical models of human behavior are not particularly useful. Such statements have motivated the work upon which this paper is based.

Within this paper, a realistically complex task (i.e., automobile driving) is presented. Various aspects of the task are illustrated by using written protocols of subjects' behavior. A hierarchy of human activities is derived by analyzing this task in general terms. A time-sharing computer analogy and block diagram are presented. Numerous mathematical methodologies appropriate to representing such a model are discussed. Finally, the state-of-the-art is summarized and the prospects are considered.

A REALISTIC TASK

The "experiment" involved a hypothetical automobile trip from the driveway of one author's house (GJ) to the home of the other author (WR). Two subjects participated (GJ and WR). Their task was to explain in detail what they would be doing throughout the hypothetical trip. Each subject independently generated a written protocol of the trip. The two resulting protocols were merged to produce Figure 1.

Figure 1 : Protocol for Typical City Trip

Insert key in ignition

Put on seat belt

Press gas pedal to floor and almost totally release

Turn key

Listen for engine sound

if so, then give gas

else, stop and go back to turn key

Wait for car to warm up - daydream

Look around - see if I can back up okay - includes using mirrors

if so, then put car in reverse

else, wait for all clear

Put right arm on seat back so as to see better

Steer with left arm, accelerate and back onto street

Determine when clear to go forward - stop backing up - press brake

Put car in drive

Look around - see if I can proceed

if so, accelerate

else, wait for all clear

Limit speed since stop sign coming up - continue looking around

Steer so as to stay "sort of" in lane

Estimate distance to stop sig: - check for time to decelerate

if so, remove foot from gas and over to brake

else, update estimate of distance - continue looking around/steering

Turn on left directional

When fairly close to stop sign, push brake harder and stop

Look left and right for traffic

else, wait for all clear and continue updating estimates

Straighten out so as to keep "sort of" in lane

Accelerate, but not too much because stop sign coming up

Look around at traffic - also at houses and yards - daydream

Execute stop sign routine - one for stopping - one for starting

- use four-way stop sign routine

Execute enroute routine - including talking, sightseeing, etc.

-
-

Plan route - what streets to take

-
-

Execute stop sign/stop light/turning/passing/lane changing routines

-
-

Look around for appropriate parking space

if one found, determine plan for getting into it

else, continue looking around and steering

Execute plan open-loop, with final updates as errors can be estimated

Put car in park

Turn off radio, heater, etc., if appropriate

Turn off key

Remove key

The activities in this figure can be categorized into several levels of behavior :

1. Reaching, twisting, and listening
2. Steering, accelerating, and braking
3. Looking around and estimating
4. Updating and evaluating
5. Planning
6. Reflecting and daydreaming

In general, lower level activities require less awareness of performing the activity (e.g., passive listening) while higher level activities require more awareness (e.g., active scanning or looking around, conscious planning, etc.).

It seems reasonable to claim that a theory of human behavior in realistic tasks should be able to model levels 1 through 5. In pursuit of this possibility, this list was somewhat compacted to yield the following aspects of behavior to be modeled :

1. Sensing and interpreting inputs
2. Planning
3. Implementing plans

To consider these three topics, an overall framework will be discussed in the next section and then, specific approaches to modeling will be considered in the subsequent section.

STRUCTURAL DESCRIPTION

Looking at the hierarchy of human activities discussed above as information processing activities, a time-sharing computer analogy seems to be a very appealing approach to understanding the structural interrelationships.

Figure 2 shows a sketch of such a time-sharing computer analogy. There are several possibilities for the central nervous system (CNS) to interact with the peripheral ¹⁾ input and output devices (i.e., the sensory and the motor systems including speech generation). The CNS is viewed as being divided into an operating system and four classes of "jobs", i.e., program/data files (see, e.g., [Tsichritzis and Bernstein, 1974; Habermann, 1976]). Hereby, a multi-processor system allowing a mixture of parallel and serial information processing is most likely to be a reasonable assumption for the human operator [Sanders, 1978].

The operating system is responsible for scheduling the programs in a time-shared manner by using a priority interrupt policy. Conflicting criteria with respect to priority have to also be evaluated by the operating system. This might be a crucial task, especially in urgent situations.

The four classes of program/data files relate to a central-nervous system representation of tasks the human operator has to perform. Each of these program classes is structured into main programs and interrelated subroutines.

¹⁾ We hasten to note that the term "peripheral" is used here in the sense of computer jargon rather than in the manner that the term is normally used in psychology.

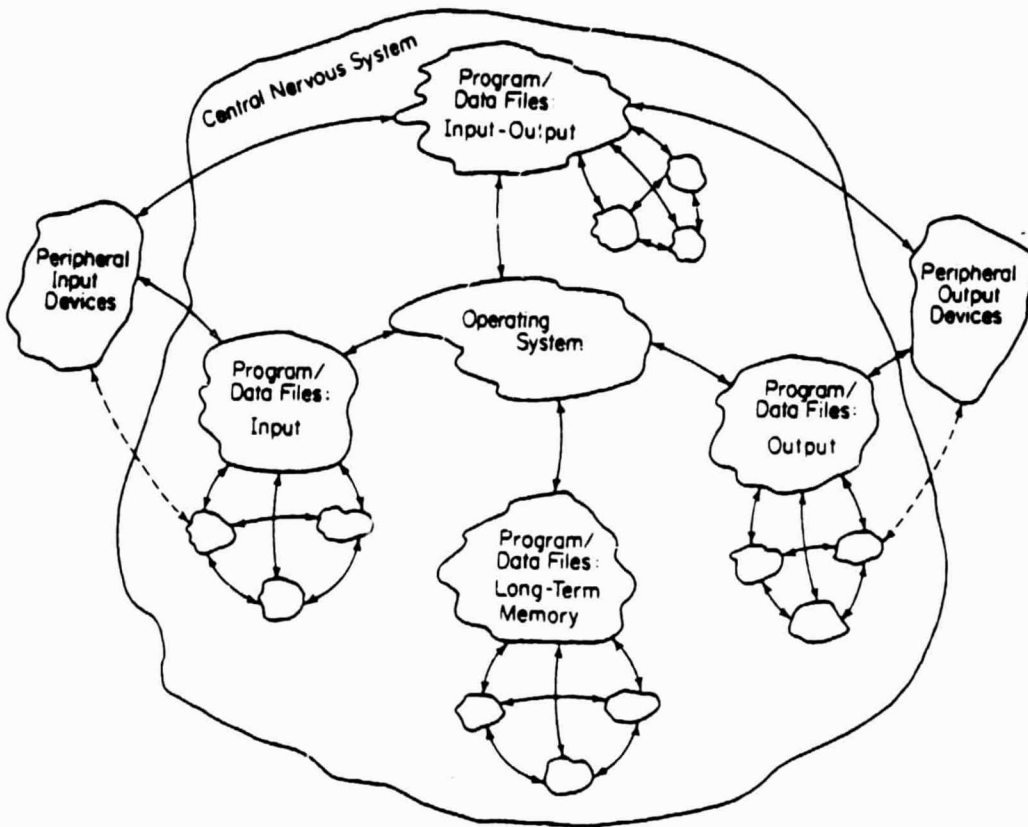


Figure 2 : Sketch of a Time-Sharing Computer Model of the Human Operator

Input programs are for activities such as monitoring tasks and looking around procedures while output programs relate to activities such as the structural organization of motion patterns (e.g., in reaching) and speech. Input-output refers to a class of programs for activities such as tracking-type control and choice-reaction tasks where the operating system need not intervene in the exercise of the input-output relationship. All three classes (i.e., input, output, and input-output) contain programs with a high level of autonomy, perhaps carried out by peripheral processors. The operating system has to initiate and supervise these autonomous processes. Additionally, the adaptive control of the sampling process in parallel tasks has to be accomplished by the operating system.

Long-term memory includes a knowledge base of facts, models, and procedures. These programs are concerned with internal processes such as reflecting and planning which have access to the knowledge base, thereby occasionally modi-

fying it. The operating system is responsible for searching through the knowledge base (see, e.g., [Atkinson and Juola, 1974 ; Habermann, 1976]).

The time-sharing computer analogy outlined here is mainly assumed as a possible framework for future thinking about complex man-machine systems. To further illustrate the hierarchical multi-level structure of human activities within this framework, a block diagram is shown in Figure 3. It is related to the six levels of behavior listed above. Only the most important information flows between the different levels are outlined.

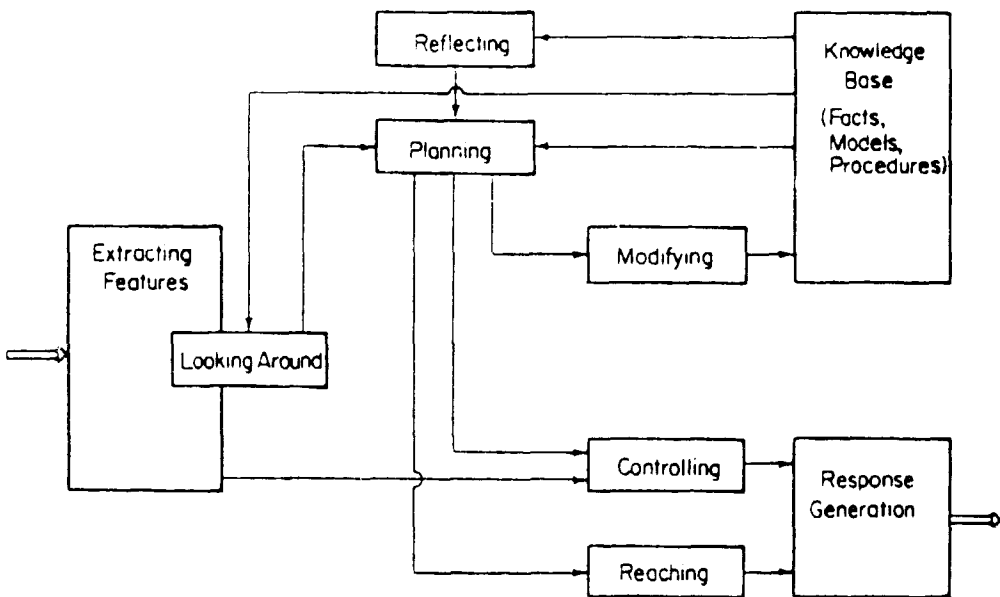


Figure 3 : Hierarchical Multi-Level Structure of Human Activities

Lower level processes (bottom of Figure 3) are normally characterized by events occurring at a high frequency as compared to higher level processes (top of Figure 3). This refers to different time scales for different levels. However, because lower level processes may be autonomous, the difference in time scales does not mean that these processes have to be considered by the operating system more frequently.

In Figure 3, planning is denoted as a major activity. With data from the knowledge base and those from lower-level looking around procedures, some-

times influenced by higher-level reflecting, planning is the development of procedures to achieve overall goals and subgoals for lower-level processes. Modifying the knowledge base as well as goal-setting for controlling and reaching are shown as examples. Controlling itself is also best described as a multi-level structure, being a subset of the overall multi-level structure of Figure 3. Controlling and reaching procedures result in output actions of the human operator via response generation which refers to the peripheral output devices in Figure 2. Correspondingly, the peripheral input devices of Figure 2 extract task-relevant features from sensory input information. This process is very closely linked with looking around procedures which are also indicated in Figure 3.

MATHEMATICAL MODELS

Sensing and Interpreting Inputs

Reconsidering the task analysis of car driving, how does the driver recognize stop signs, other cars, children, etc.? To pursue this question, the literature of pattern recognition and artificial intelligence was considered. Fortunately, the literature in these areas has recently been summarized in the Systems, Man, and Cybernetics Review [IEEE, 1977], by Sklansky [1978], and in books by Winston [1975, 1977] for pattern recognition and artificial intelligence, respectively.

Two approaches to pattern recognition have received particular attention : statistical methods and syntactical methods. The statistical methods use discriminant functions to classify patterns. This involves extracting a set of features from the pattern and statistically determining how close this feature set is to the a priori known features of candidate classes of patterns. The class whose features most closely match the measured features is chosen as the match to the pattern of interest, with of course some consideration given to the a priori probabilities of each class and the costs of errors.

The syntactic methods partition each pattern into subpatterns or pattern primitives. It is assumed that a known set of rules (a grammar) is used to compose

primitives into a pattern. One approach to recognizing primitives is to use the statistical approach noted above.

Another aspect of pattern recognition involves image processing. Here, each picture point (pixel) is classified according to gray level. Then, thresholds are used to segment the picture. More elaborate approaches use multi-dimensional classification of each pixel and then, use an appropriate multi-dimensional clustering of similar pixels.

Artificial intelligence researchers have devoted considerable effort to scene analysis. With emphasis on understanding scenes composed of somewhat arbitrary collections of blocks, methods have been developed to pick particular blocks out of scenes, even if the desired block is partially hidden.

Most of the methods discussed above have worked reasonably well within limited domains. When the context within which one is working is well-understood, it is often possible to successfully sense and interpret inputs, although considerable computational power may be needed.

While the advent of inexpensive microelectronics might allow one to utilize large amounts of computational power in a model of human sensing and interpretation of data, there are bigger problems to be solved. Namely, it is difficult to deal with realistic contexts in a static manner. What a human sees depends on what he is looking for, what he expects to see, and the costs of not seeing it. These aspects of seeing cannot be considered out of context and without reference to the specific individual involved. From a theoretical point of view, one might represent context in terms of a priori probabilities with perhaps some form of Bayesian updating [Curry, 1971]. However, while this approach is theoretically tenable, it does present enormous measurement problems.

Several investigators have considered the issue of how the human allocates his attention among multiple displays [Senders, 1964 ; Carbonell, 1966, 1968 ; Rouse and Greenstein, 1976 ; Sheridan and Tulga, 1978]. However, these models have only been tested in fairly well-structured situations and thus, c.e

as yet unproven in realistically complex tasks. Further, it is by no means obvious that these models will ever be able to handle looking around in the sense it appears in the driving scenario.

Thus, a general mathematical theory of human sensing and interpreting of inputs is far from available, especially if one would like to program this theory to drive a car. On the other hand, the disciplines of pattern recognition and artificial intelligence are beginning to succeed in specific applied domains such as industrial inspection [Chien and Snyder, 1975 ; Perkins, 1977] and medical diagnosis [Wechsler and Sklansky, 1975] . Perhaps a concatenation of specific successes will lead to new insights into the problems of context and individual differences. In addition, specific context-related investigations seem to be necessary to gain better understanding of human procedures in sensing and interpreting inputs and to define measures for these activities which can be used for validating mathematical models.

Planning

Studying the task analysis of car driving, it is readily apparent that much of the subjects' conscious activities were devoted to developing, initiating, and monitoring plans. This observation agrees with analyses of verbal protocols in several other task domains [Newell and Simon, 1972] . In fact, one might expect this result within any purposeful activity for which there are goals as yet unfulfilled.

To discuss planning, one first must emphasize the distinction between the process of developing plans and the process of executing plans [Martino, 1972] . Within this section, only plan development will be considered while the following section will discuss plan execution. One way to illustrate the difference between these two activities is to characterize plan development as a problem solving activity while plan execution is looked at as a program execution activity [Newell and Simon, 1972] .

One develops a plan in hopes that its execution will achieve some goals. While one usually accepts the overall goal as given (e.g., land the aircraft),

the process of developing subgoals is often left to the human. The partitioning of goals into subgoals and then subgoals into lesser subgoals, etc. reflects a hierarchical mode of planning that has received considerable attention [Sacerdoti, 1975 ; Weissman, 1976] .

The hierarchical approach allows one to develop plans that are broad and sketchy as opposed to detailed and concise. Thus, low-level subgoals can be temporarily ignored until their immediacy demands attention. Similarly, future actions which require preconditions that are not as yet assured can perhaps be temporarily ignored if one feels that the environment is "hospitable" to one's goals [Weissman, 1976] .

On the other hand, low level subgoals must eventually be dealt with. Then, a concise system dynamics model such as Carbonell's probably provides a reasonable description of human behavior [Carbonell, 1969] . This model assumes that the human is dealing with a system describable by quantitative state transitions and amenable to quantitative control actions.

Such low level planning is probably unconscious in the sense that the human is unaware of it. From the perspective of a computer analogy, one might say that high level, conscious planning is like executing an interpreted program. (An interpreted program is one where the computer "consciously" has to interpret the meaning of each statement as it is executed.) On the other hand, low level unconscious planning is similar to executing a compiled program [Newell and Simon, 1972] . In fact, it might be claimed that low level planning cannot really be called planning. Instead, such activities are only the details of implementation, which are discussed later in this paper.

Planning appears to include the following aspects :

1. Generation of alternative plans,
2. Imagining of consequences,
3. Valuing of consequences,
4. Choosing and initiating plan,
5. Monitoring plan execution,
6. Debugging and updating plan,

where the latter two aspects deal with observing plan execution and subsequent replanning, but not with actual implementation.

How might one model the generation of alternative plans ? One can look at a plan as a linked set of subplans [Weissman, 1976] . However, at some level, subplans must be specific. In many tasks, the alternatives are clearly defined at the outset. On the other hand, there are many interesting tasks (e.g., engineering design) where the human must create alternatives. In such cases, humans usually first consider alternatives that have been successful in previous situations.

One might use Newell's pattern-evoked production systems as a model of how the human accomplishes this search for alternatives [Newell and Simon, 1972] . A production is a rule consisting of a situation recognition part that is a list of things to watch for, and an action part that is a list of things to do. (The word "production", as it is used here, has absolutely nothing to do with the manufacturing connotation of the word.)

As an alternative to production systems, the idea of scripts might provide a reasonable model. "A script is a structure that describes appropriate sequences of events in a particular context." [Schank and Abelson, 1977] . In other words, a script is somewhat like a standard plan or subplan that is evoked in particular situations. For example, many people probably have "driving to work" scripts which they unconsciously, but nevertheless faithfully, follow.

The ideas of production systems and scripts are both related to the idea of the human having an internal model. However, as the reader will see, it is very different from the type of model assumed in the system dynamics domain. Namely, productions and scripts provide forecasts of typical consequences rather than models of internal state transitions.

Sometimes a new alternative is needed and it is very difficult to say how a totally new idea is generated. Linking the idea of associative memory [Anderson and Bower, 1973 ; Kohonen, 1977] with the idea of production systems or scripts, one can conjecture that new ideas are generated when the

criterion for matching the new subgoal with past experiences is relaxed and/or non-standard features of the situation are emphasized.

Long-term plans that will not be immediately implemented are probably developed at the highest level in the goal hierarchy with only major goals considered. Such a plan might be a somewhat vague verbal statement or perhaps a sketch of activities and relationships. It is interesting to speculate upon (and perhaps research) what plans look like in the "mind's eye". For example, are plans list-like or are they more spatial, such as Warfield's interpretive structural models [Warfield, 1976].

Short-term plans that will require immediate implementation cannot be quite so sketchy. In this case, the human has to consider specific actions. One would probably be reasonably successful in modeling this type of plan using production systems where specific features of the environment would automatically evoke particular responses. This type of behavior falls into the category of input-output programs as defined in the time-sharing computer analogy introduced earlier. Realistic examples of application of this idea include aircraft attitude instrument flying [Goldstein and Grimson, 1977] and air traffic control [Wesson, 1977].

Given a set of candidate plans, the human must forecast or imagine the consequences of implementing each plan. One might assume that the human performs some type of mental simulation of the plan. For example, the human might use his current perception of the system dynamics to extrapolate the system's state as a function of planned control strategy. Rouse has developed a model that describes this type of behavior. Succinctly, the model assumes that the human has both a long-term and short-term model of the system with which he is dealing and, that he uses a compromise between the two state predictions obtained from these models as a basis for decision making [Rouse, 1977a].

However, when plans are sketchy, at least in terms of intermediate preconditions, the human probably does not actually calculate consequences but instead simply maps plan features to previously experienced consequences.

Then, until evidence forces him to reject the assumption, he assumes these previously experienced consequences will prevail. This type of behavior is represented quite nicely by the scripts concept [Schank and Abelson, 1977] .

Imagined consequences are then compared to goals. For low level plans, the comparison might be based on a well-defined criterion function. However, this is probably not the case for high level plans. Since high level goals and imagined consequences may be verbal and rather vague, it is likely that the human only tries to satisfice rather than optimize. One might represent this phenomenon using multi-attribute utility functions [Keeney and Raiffa, 1976] that have broad optima. Alternatively, concepts from fuzzy set theory [Zadeh, et al., 1975 ; Kaufman, 1975] might be used to consider the membership of a set of consequences in the fuzzy set of acceptable consequences. The utility function approach is probably appropriate if one assumes that the human has a fairly precise knowledge of the possible consequences, and subsequently values some more than others. On the other hand, the fuzzy set approach would seem to be applicable to situations where the human's perception of the consequences is actually fuzzy.

The human chooses the most satisfactory plan and initiates its execution. If none of the available plans meets an acceptable level of satisfaction, the human either tries to debug the set of plans under consideration or perhaps tries to develop new plans. Debugging of partially failed plans may initially involve local experimentation to determine the cause of plan failure rather than a global reevaluation and complete replanning [Davis, 1977] . One approach to modeling debugging or trouble-shooting of plans is with fuzzy set theory [Rouse, 1978, 1979] .

Assuming that a plan has been initiated, the human monitors its execution and only becomes involved (in the sense of planning) if the unanticipated occurs or execution reaches the point that some phase of the plan must be more concisely defined. Monitoring for the unexpected might be modeled using production systems that trigger when the preconditions are not satisfied. Other approaches, based on filter theory [Gai and Curry, 1976] or pattern recognition methods [Greenstein and Rouse, 1978], are also available.

Once the unexpected has been detected, planning might shift into the above mentioned debugging mode. On the other hand, the need to shift from sketchy to concise planning may involve abandoning, for the moment, the broad hierarchical mode and shifting to a detailed partially pre-programmed mode.

How do all these bits and pieces fit into an overall model of planning ? While it does seem that the hierarchical approach to planning combined with the production system and script ideas provide a reasonable framework, the state-of-the-art certainly does not allow one to construct a context-free planning model in the form of an executable computer program. This may be an inherent limitation if one accepts the premise that much of human behavior is merely a reflection of the task environment [Newell and Simon, 1972]. If this premise is true, then one should be very careful that laboratory abstractions capture a sufficient portion of the real world environment and thereby allow results to actually be transferable. Otherwise, one is only developing a theory of human behavior in laboratory games.

As a final comment on planning, a very important issue concerns the level at which one's study of planning behavior should be addressed. While an approach at the neuron level [Scott, 1977] may eventually lead to a successful model of human planning behavior, such an approach is unlikely to lead to success in the near future. Alternatively, one might try to develop models that explain or predict whether or not a plan will be successful. However, this type of model would yield little information about the planning process. It seems that one must approach studies on the conscious planning level using either verbal protocols [e.g., Simon and Newell, 1972 ; Rasmussen, 1974, 1976] or at least methods that require plans to be explicitly measurable. Then, the variety of approaches to modeling discussed in this section can be applied to describing the planning process.

Implementing Plans

Implementing plans refers to human action, mainly such activities as controlling and reaching in the multi-level structure of Figure 3. Two basic approaches for mathematically describing these actions can be distinguished. The first

approach includes time-line analysis, queueing theory, and simulation techniques, whereas the second includes the control theoretic approach in a more general sense.

In time-line analyses, the execution times of all particular task elements of a certain multi-task situation are assessed as well as the total task time needed [Siegel and Wolf, 1969 ; Linton, Jahns, and Chatelier, 1977 ; Pew, Baron, Feehrer, and Miller, 1977 ; Moray, 1979]. Available time margins or expected time pressure of the human operator can be calculated in order to estimate total task system performance and human operator workload. This method has been applied to evaluating rather complex man-machine systems by taking these apart in very much detail, e.g., to the level of reaching times for single switches.

A related, but more analytical approach is the queueing theoretic one [Carbonell, 1966, 1968 ; Senders and Posner, 1976 ; Rouse, 1977b ; Walden and Rouse, 1978 ; Chu and Rouse, 1977, 1978 ; Schmidt, 1978]. It is suitable not only for analysis, but also for design purposes. The different tasks of a multi-task situation are considered as customers in a queue waiting to be serviced. Arrival and service rates as well as the waiting time for the tasks are characteristic measures. Service with a priority policy is possible. Also several servers (e.g., the human operator and a computer) may share responsibility for the total task.

Queueing theory models are particularly useful when employing the time-sharing computer analogy of Figure 2. For example, with such a representation, workload in terms of fraction of time busy is readily computable. Chu and Rouse [1977, 1978] have employed such a queueing description as a basis for developing an algorithm for controlling workload.

Time-line analysis and queueing theory look at the implementation of actions in terms of time expenditure. If the accuracy of the actions is also to be taken into account, these methods have to be combined with others. Simulation techniques seem to be a reasonable approach where micro-subroutines simulate dynamically

such human operator behaviors as short-term memory recall and movement of hands and feet [Wherry, 1976]. This leads back to the time-sharing computer analogy. A goal-oriented priority interrupt structure for handling all tasks appropriately in a multi-task situation is most promising. However, this results in a more artificial-intelligence oriented simulation, using heuristics and data handling algorithms, rather than an analytical description.

A different approach for the description of human actions in man-machine systems applies control theory. Models for continuous manual control are well established. Numerous summaries in the forms of reports and books exist (e.g., [McRuer and Krendel, 1974; Sheridan and Ferrell, 1974; Johanssen, Boller, Donges, and Stein, 1977]). Considering the automobile driving scenario discussed here, it is useful to note recent papers on manual control models of driving by Bekey, Burnham, and Seo [1977] and McRuer, Artman, Weir, and Klein [1977].

The quasi-linear and the optimal control models are the most popular approaches to description of manual control tasks. The quasi-linear models describe the human control behavior by some task-specific modification of a generalized transfer function which is best satisfied in the crossover frequency region for many controlled element dynamics. In addition, an internal human noise source (the remnant) summarizes the portion of the human's output which cannot be explained linearly.

The optimal control model [Kleinman, Baron, and Levison, 1970] includes two noise sources and also has a time delay and a neuromuscular lag term with a time constant similar to that of the quasi-linear model. A Kalman filter estimates the states of the controlled element, whereas a predictor compensates for the time delay. The optimal gains are calculated with respect to a criterion function which is a weighted sum of mean squared values of state and control variables.

The control theory models have been applied in several domains including aircraft piloting, automobile driving, ship piloting, and anti-aircraft artillery. Further, several display design methodologies have been developed. A recent

special issue of Human Factors reviews many applications of control theory models [Rouse, 1977c].

With both the crossover model and the optimal control model, a stochastic reference input, either forcing function or disturbance, has been assumed. Therefore, these models are mostly applicable to the inner loops of manual vehicle guidance and control tasks. In the case of the optimal control model, key elements of this have also been applied to monitoring and decision-making tasks.

Many realistic tasks exist, however, in which deterministic inputs are dominant. Taking the baseline car driving scenario as an example, a reasonably complicated deterministic input exists, i.e., the course of the street. For this task, a two-level model has been proposed which has a closed-loop stabilization controller and an anticipatory open-loop guidance controller working in parallel [Donges, 1975, 1978]. The perceptual aspects of the anticipation of changes in the course of the street have been explained. However, it has been assumed that the driver tries to eliminate all deviations from the middle line of the street.

To overcome this simplification, the street might be viewed as a target tube in which the driver is allowed to move his car. Interestingly enough, many other human control tasks in vehicle guidance and industrial process control also require controlling the state of the systems within a target tube rather than along a single reference line. Such a criterion makes these tasks much more relaxed than one often assumes in man-machine systems experiments.

Reviewing the control theory literature, some applicable methods for controlling within a target tube were found. They have never been used with man-machine systems problems. One approach assumes a criterion function which puts less weight on small errors by taking the fourth power of the error instead of the second power as in the optimal control model [Galiana and Glavitsch, 1973]. The other approach is called unknown-but-bounded control [Bartsekas and Rhodes, 1971; Glover and Schweppe, 1971; Schweppe, 1973].

The unknown-but-bounded control approach combines state variable with set theoretic descriptions. Due to the higher mathematical effort, this approach has infrequently been applied in automatic control situations. However, it seems worthwhile to consider this approach in modeling biological or sociological systems. Human behavior in general is goal-oriented and the goal is very often defined as bringing or keeping some state variables within a certain target set or target tube.

In the baseline scenario, one dimension of the target tube would be the width of the street or one of its lanes. Other dimensions are given by the other states of the system, e.g., the lateral rate of change, for which maximally tolerable values are also prescribed. The effective target tube is planned by the driver as an area inside of which no control actions are necessary (see linear-plus-dead-band control laws in Glover and Schweppe [1971]). Planning the effective target tube might also include some fuzziness. Whether the unknown-but-bounded control approach can be combined with fuzzy set theory which has recently been applied in industrial process control [King and Mamdani, 1977 ; Tong, 1977] has not as yet been investigated.

Another interesting issue is the notion of the internal model which has been considered to some extent in the discussion of the planning process. In modeling how the human chooses among alternative courses of action, an important issue concerns whether the human possesses a correct internal model of his environment or, whether the model is incorrect as in learning situations or, very approximative as in large-scale systems (see, e.g., [Sheridan and Johanssen, 1976]). The process of building up an internal model during learning and how to use it by changing control laws or choosing among different kinds of control laws in time-varying systems, should be further investigated. The literature on adaptive manual control shows, for example, that the models assume a set of predetermined control laws matched with a set of different system dynamics (see, e.g., [Young, 1969]).

This leads to the idea of a memory for motor patterns. Instead of having an input-output transfer behavior, the human operator initializes predetermined motor patterns in many situations. These patterns are slightly corrected during

their actual execution (see, e.g., [Adams, 1971]). Good examples are walking, bicycle riding, and piano playing. Also, the coordination and timing of a series of discrete manual control actions, e.g., in troubleshooting tasks or in checking procedures of aircraft pilots or process operators, can be explained by predetermined motor patterns.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In considering various approaches to tying all of the discussions in this paper together, the diagram in Figure 4 has been found to be most useful. This diagram is a variation of a diagram discussed by Johannessen [1976] for vehicle control tasks and Sheridan [1976] for human control of vehicles, chemical plants, and industrial robots. Similar diagrams have been published by Bernotat [1964] and Kelley [1968].

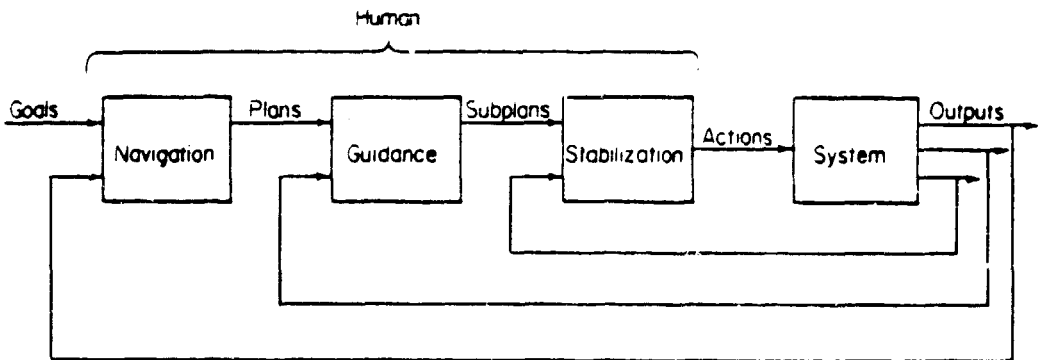


Figure 4 : Hierarchy of Human Behavior

This diagram can be used to represent well-defined man-machine systems tasks such as those discussed by Johannessen [1976] and Sheridan [1976] as well as less well-structured tasks. For example, goals could mean success in life, plans could mean a career outline, subplans could mean a scheme to succeed in a specific job, and actions could mean one's daily activities. Thus, the diagram has broad applicability.

How can one analytically deal with such a general description? If one looks at control theory with a very general perspective that includes control with

respect to continuous events as well as discrete events, then one can subsume most analytical methods (e.g., linear systems theory and queueing theory) within the category of control theory. This generalization, and willingness to expand the set of tools one utilizes, enables quantitative analysis of a larger portion of the hierarchy of behavior.

However, there are limits to context-free analytical modeling. First, there is the very important idea that human behavior mainly reflects the task environment. Thus, searching for a specific analytical model of general human behavior may only be fruitful to the extent that all task environments are common. Perhaps then, one should first search for commonality among environments rather than intrinsic human characteristics. In other words, a good model of the demands of the environment may allow a reasonable initial prediction of human performance. Thus, it is reasonable to initially assume that the human will adapt to the demands of the task and perform accordingly.

A second limitation to analytical modeling is due to the human's lack of analytical thinking, especially at upper levels of the hierarchy. First of all, the human is more of a satisficer than an optimizer. Thus, ideas such as a target tube within control tasks, fuzzy set theory, and some concepts from utility theory deserve more study and application within man-machine systems. What this means is that one should look at optimization with respect to broad criteria that allow multiple satisfactory solutions. An alternative approach to this issue is to discard optimization, but this would leave the modeler stripped of one of his most important tools and without a viable alternative.

Beyond the idea of satisficing, another important limitation to analytical modeling is that humans simply do not worry about details until it becomes necessary to do so. Thus, planning can be sketchy, perhaps in the form of scripts. Such sketchy planning can mean a drastic reduction in mental workload and also, that the human has the resources left to deal with more tasks as well as the flexibility to react to unforeseen events. These characteristics are precisely the reasons why humans are often included in systems.

However, the scripts idea presents a problem. While everyone might agree that humans use scripts to expedite performance of many tasks, knowledge of their existence is not sufficient to predict performance. One must know what the script specifically is. Thus, in complex tasks, one must measure not only performance (e.g., RMS error), but also the script. This suggests that verbal protocols (perhaps analyzed by a computer that understands natural language [Bhaskar and Simon, 1977]) may be increasingly important research tools.

To conclude, this paper has presented a fairly general, but mainly verbal, model of human behavior in complex tasks. The ideas discussed have been based on analysis of a specific complex task (car driving) as well as a thorough review of the literature. Three very specific ideas have emerged. First, control should be looked at in a broad sense, incorporating a wide range of analytical methodologies. Second, the human satisfies rather than optimizes and criteria should reflect this. Third, higher-level activities such as planning require approaches that allow incompleteness, and approaches that capture the process of these activities and not just the results.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was performed at the University of Illinois at Urbana-Champaign during the leave of absence of the first author from his home institute in Germany. It was supported by the National Aeronautics and Space Administration under NASA-Ames Grant NSG-2119.

The authors wish to thank their colleagues in Germany and the USA who made valuable comments on a previous version of this paper which was presented to the 14th Annual Conference on Manual Control, University of Southern California in April, 1978. Further, the authors gratefully acknowledge the stimulation received during numerous discussions at the NATO Workshop on Mental Workload, Mati, Greece in September, 1977.

REFERENCES

- Adams, J.A. : A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 1971, 3 (2), 111-150.
- Anderson, J.R. and Bower, G.H. : Human associative memory. New York : Wiley, 1973.
- Atkinson, R.C. and Juola, J.F. : Search and decision processes in recognition memory. In : D.H. Krantz et al. (Eds.), *Contemporary developments in mathematical psychology*, Vol. 1, San Francisco : W.H. Freeman and Co., 1974.
- Bekey, G.A. ; Burnham, G.O. ; and Seo, J. : Control theoretic models of human drivers in car following. *Human Factors*, August, 1977, 19, (4), 399-413.
- Bernotat, R. : Der Mensch als Element des Flugführungssystems. *Luftfahrttechnik, Raumfahrttechnik*, March, 1964, 10 (3), 66-68.
- Bertsekas, D.P. and Rhodes, I.B. : On the minimax reachability of target sets and target tubes. *Automatica*, March, 1971, 7 (2), 233-247.
- Bhaskar, R. and Simon, H.A. : Problem solving in semantically rich domains : an example from engineering thermodynamics. *Cognitive Science*, April, 1977, 1 (2), 193-215.
- Carbonell, J.R. : A queueing model of many-instrument visual sampling. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, December, 1966, HFE-7 (4), 157-164.
- Carbonell, J.R. : On man-computer interaction : a model and some related issues. *IEEE Transactions on Systems, Science, and Cybernetics*, January, 1969, SSC-5 (1), 16-26.
- Carbonell, J.R. ; Ward, J.L. ; and Senders, J.W. : A queueing model of visual sampling : experimental validation. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, September, 1968, MMS-9 (3), 82-87.
- Chien, R.T. and Snyder, W. : Visual understanding of hybrid circuits via procedural models. *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Tbilisi, USSR, September, 1975, 742-745.
- Chu, Y.Y. and Rouse, W.B. : Optimal adaptive allocation of decision making responsibility between human and computer in multi-task situations. *Proceedings of the 1977 International Conference on Cybernetics and Society*, Washington, September, 1977, 168-175.

- Chu, Y.Y. and Rouse, W.B. : Pilot decision making in a computer-aided flight management situation. Proceedings of the Fourteenth Annual Conference on Manual Control, University of Southern California, April, 1978, 677-690.
- Curry, R.E. : A Bayesian model for visual space perception. Proceedings of the Seventh Annual Conference on Manual Control, University of Southern California, June, 1971, 187-196.
- Davis, P.R. : Using and re-using partial plans. Ph.D.dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1977.
- Donges, E. : Experimentelle Untersuchung des menschlichen Lenkverhaltens bei simulierter Straßenfahrt. Automobiltechnische Zeitschrift, 1975, 77, 141-146, 185-190.
- Donges, E. : A two-level model of driver steering behavior. Human Factors, December, 1978, 20 (6), 691-707.
- Gai, I. and Curry, R.E. : A model of the human observer in failure detection tasks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, February, 1976, SMC-6 (2), 85-94.
- Galiana, F.D. and Glavitsch, H. : State adaptation in power systems control. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, New York, 1973.
- Glover, J.D. and Schweppe, F.C. : Control of linear dynamic systems with set constrained disturbances. IEEE Transactions on Automatic Control, October, 1971, AC-16, 411-423.
- Goldstein, I.P. and Grimson, W. : Annotated production systems : a model for skill acquisition. Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence, MIT, August, 1977, 311-317.
- Greenstein, J.S. and Rouse, W.B. : A model of human event detection in multiple process monitoring situations. Proceedings of the Fourteenth Annual Conference on Manual Control, University of Southern California, April, 1978.
- Habermann, A.N. : Introduction to operating system design. Chicago : Science Research Associates, Inc., 1976.
- IEEE, Current perspectives in pattern recognition. Systems, Man, and Cybernetics Review, August, 1977, 6 (4).
- Johannsen, G. : Preview of man-vehicle control session. In : T.B. Sheridan and G. Johannsen (Eds.), Monitoring behavior and supervisory control, New York : Plenum Press, 1976.

- Johannsen, G. ; Boller, H.E. ; Donges, E. ; and Stein W. : Der Mensch im Regelkreis - Lineare Modelle. München : Oldenbourg, 1977.
- Kaufman, A. : Introduction to the theory of fuzzy subsets. New York : Academic Press, 1975.
- Keeney, R.L. and Raiffa, H. : Decision with multiple objectives. New York : Wiley, 1976.
- Kelley, C.R. : Manual and automatic control. New York : Wiley, 1968.
- King, P.J. and Mamdani, E.H. : The application of fuzzy control systems to industrial processes. *Automatica*, May, 1977, 13 (3), 235-242.
- Kleinman, D.L. ; Baron, S. ; and Levison, W.H. : An optimal control model of human response. Part I : Theory and validation. *Automatica*, 1970, 6, 357-369.
- Kohonen, T. : Associative memory. New York : Springer-Verlag, 1977.
- Linton, P.M. ; Jahns, D.W. ; and Chatelier, P.R. : Operator workload assessment model : an evaluation of a VF/Va-V/STOL system. In : *Methods to assess workload*. AGARD-CPP-216, 1977.
- Martino, J.P. : Technological forecasting for decision making. New York : American Elsevier, 1972.
- McRuer, D.T. ; Allen, R.W. ; Weir, D.H., and Klein, R.H. : New results in driver steering control models. *Human Factors*, August, 1977, 19, (4), 381-397.
- McRuer, D.T. and Krendel, E.S. : Mathematical models of human pilot behavior. Advisory Group Aerospace Research Development, Neuilly sur Seine, France : AGARDograph No. 188, 1974.
- Moray, N. (Ed.) : Mental workload. New York : Plenum Press, 1979.
- Newell, A. and Simon, H.A. : Human problem solving. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1972.
- Perkins, W.A. : Model-based vision system for scenes containing multiple parts. *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, MIT, August, 1977, 678-684.
- Pew, R.W. ; Baron, S. ; Feehrer, C.E. ; and Miller, D.C. : Critical review and analysis of performance models applicable to man-machine systems evaluation. Bolt Beranek and Newman, Inc., Cambridge, Mass. : Rept. No. 3446, 1977.
- Rasmussen, J. and Jensen, A. : Mental procedures in real-life tasks : a case study of electronic trouble shooting. *Ergonomics*, May, 1974, 17 (3), 293-307.

- Rasmussen, J. : Outlines of a hybrid model of the process plant operator. In : T.B. Sheridan and G. Johanssen (Eds.), *Monitoring behavior and supervisory control*. New York : Plenum Press, 1976.
- Rouse, W.B. : A theory of human decision making in stochastic estimation tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, April, 1977, SMC-7 (4), 274-283.
- Rouse, W.B. : Human-computer interaction in multi-task situations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, May, 1977, SMC-7 (5), 384-392.
- Rouse, W.B. (Ed.) : Special issue on applications of control theory in human factors. *Human Factors*, August and October, 1977, 19 (4) (5).
- Rouse, W.B. : A model of human decision making in a fault diagnosis task. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, May, 1978, SMC-8 (5), 357-361.
- Rouse, W.B. : A model of human decision making in fault diagnosis tasks that include feedback and redundancy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, April, 1979, SMC-9, (4), 237-241.
- Rouse, W.B. and Greenstein, J.S. : A model of human decision making in multi-task situations : implications for computer aiding. *Proceedings of the 1976 International Conference on Cybernetics and Society*, Washington, November 1976, 425-433.
- Sacerdoti, E.D. : A structure for plans and behavior. Ph.D. dissertation, Stanford University, 1975.
- Sanders, A.F. : Some remarks on mental load. In : N. Moray (Ed.) *Mental workload*. New York : Plenum Press, 1979.
- Schank, R.C. and Abelson, R.P. : *Scripts, plans, goals, and understanding*. Hillsdale, N.J. : Lawrence Erlbaum, 1977.
- Schmidt, D.K. : A queueing analysis of the air traffic controller's workload. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, June, 1978, SMC-8 (6), 492-498.
- Schweppe, F.C. : *Uncertain dynamic systems*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1973.
- Scott, A.C. : *Neurophysics*. New York : Wiley, 1977.

- Senders, J.W. : The human operator as a monitor and controller of multi-degree of freedom systems. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, September, 1964, HFE-5 (1), 2-5.
- Senders, J.W. and Posner, M.J.M. : A queueing model of monitoring and supervisory behavior. In : T.B. Sheridan and G. Johannsen (Eds.), Monitoring behavior and supervisory control. New York : Plenum Press, 1976.
- Sheridan, T.B. : Review of the international symposium on monitoring behavior and supervisory control. Proceedings of the Twelfth Annual Conference on Manual Control, University of Illinois at Urbana-Champaign, May, 1976, 3-13.
- Sheridan, T.B. and Ferrell, W.R. : Man-machine systems : information, control and decision models of human performance. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1974.
- Sheridan, T.B. and Johannsen, G. (Eds.) : Monitoring behavior and supervisory control. New York : Plenum Press, 1976.
- Sheridan, T.B. and Tulga, M.K. : A model for dynamic allocation of human attention among multiple tasks. Proceedings of the Fourteenth Annual Conference on Manual Control, University of Southern California, April, 1978.
- Siegel, A.J. and Wolf, J.J. : Man-machine simulation models. New York : Wiley, 1969.
- Sklansky, J. : Image segmentation and features extraction. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, April, 1978, SMC-8 (4), 237-247.
- Tong, R.M. : A control engineering review of fuzzy systems. Automatica, November, 1977, 13 (6), 559-569.
- Tsichritzis, D.C. and Bernstein, P.A. : Operating systems. New York : Academic Press, 1974.
- Walden, R.S. and Rouse, W.B. : A queueing model of pilot decision making in a multi-task flight management situation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, December, 1978, SMC-8 (12), 867-875.
- Warfield, J.N. : Societal systems : planning, policy, and complexity. New York : John Wiley, 1976.
- Wechsler, H. and Sklansky, J. : Automatic detection of rib contours in chest radiographs. Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Tbilisi, USSR, September, 1975, 688-694.

- Weissman, S.J. : On a computer system for planning and execution in incompletely specified environments. Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1976.
- Wesson, R.B. : Planning in the world of the air traffic controller. Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence, MIT, August, 1977, 473-479.
- Wherry, R.J., Jr. : The human operator simulator - HOS. In : T.B. Sheridan and G. Johanssen (Eds.), *Monitoring behavior and supervisory control*. New York : Plenum Press, 1976, 283-293.
- Winston, P.H. (Ed.) : *The psychology of computer vision*. New York : McGraw-Hill, 197...
- Winston, P.H. : *Artificial intelligence*. Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1977.
- Young, L.R. : On adaptive manual control. *Ergonomics*, 1969, 12, 635-674.
- Zadeh, L.A. ; Fu, K.S. ; Tanaka, K. ; and Shimura, M. (Eds.) : *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. New York : Academic Press, 1975.